

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkötekniikan osasto

**Mika Keski-Heikkilä**

## **Langattoman lähiverkkoliittynnän tarjoaminen kuluttajalle**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten Espoossa 12.3.1996.

Työn valvoja: Apulaisprofessori Pertti Vainikainen

Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Pekka Linna

TKK SÄHKÖTEKNIKA  
OSASTON KIRJASTO  
OTAKAARI 5 A  
02150 ESPOO

19968

<b>Tekijä:</b> Mika Keski-Heikkilä	
<b>Työn nimi:</b> Langattoman lähiverkkoliittynän tarjoaminen kuluttajalle	
<b>Päivämäärä:</b> 12.3.1996	<b>Sivumäärä:</b> 70
<b>Osasto:</b> Sähkötekniikan osasto	
<b>Professuuri:</b> S-26 Radiotekniikka	
<b>Työn valvoja:</b> Apulaisprofessori Pertti Vainikainen	
<b>Työn ohjaaja:</b> DI Pekka Linna	
<p>Tässä työssä on esitelty langattoman tilaajaliittynän tarjoamista kuluttajalle langatonta lähiverkkokorttia ja taajuusmuunninta käyttäen. Työssä on myös esitelty langattomia lähiverkkoja ja niiden tämänhetkistä standardointitilannetta, IEEE 802.11-standardin on määrä valmistua vuoden 1996 aikana ja uusi ETSI:n standardoima nopea langaton lähiverkkostandardi HIPERLAN on myös valmistumisvaiheessa.</p> <p>Lähiverkkokortin signaalin ylemmälle taajuudelle siirtävän taajuusmuuntimen ominaisuuksia on mitattu laboratorio-olosuhteissa ja näiden mittausten perusteella on laskettu teoreettinen suurin saavutettava tukiaseman solusäde.</p> <p>Langattoman lähiverkkoliittynän tarjoamiseksi työssä on tehty kustannus-tarkastelu, jossa arvioidaan, millä vastaanottimen (suunta-antenni ja taajuusmuunnin) hinnalla langattoman lähiverkkoliittynän tarjoaminen olisi kaupallisesti kannattavaa Helsingin alueella. Muutamista laskelmaa varten tehdyistä oletuksista on laskettu myös tulosten herkkyyttä oletusten muutoksille. Herkkyysanalyysin perusteella voidaan päätellä, että laskelman tulokset eivät ole kovin herkkiä palvelun penetraatiokehityksen muutoksille verkon tilaajapäähän painottuvien kustannusten vuoksi. Sen sijaan keskimääräisen käyttäjän kuukausittainen palvelun käyttötuntimäärä (tuntia/kuukaudessa) vaikuttaa huomattavasti saavutettuihin tuloksiin.</p>	
<b>Avainsanat:</b> langaton lähiverkko, langaton tilaajaliityntä	



**Author:** Mika Keski-Heikkilä**Name of the thesis:** Offering wireless local area network access to the customer**Date:** 12.3.1996**Number of pages:** 70**Faculty:** Electrical Engineering**Professorship:** S-26 Radio Engineering**Supervisor:** Associate Professor Pertti Vainikainen**Instructor:** M.Sc. Pekka Linna

The subject of this thesis is to present a wireless access to the customer using wireless local area network equipment with a frequency converter. The converter transfers the signal from a wireless local area network card to a higher frequency. Also an overview on wireless local area networks and their standardisation at the moment is given. The IEEE 802.11-standard is going to be finalised by the end of 1996 and the new ETSI's fast wireless local area network standard HIPERLAN is almost ready.

A frequency converter constructed for this thesis has been measured in the laboratory environment. By using these measurements it is possible to calculate the theoretical maximum cell radius for the base station.

Based on a techno-economic evaluation of the wireless access network in Helsinki, the maximum cost for the frequency converter enabling commercially profitable operation has been approximated. Also a sensitivity analysis for some of the assumptions used in the calculation has also been carried out. As a result it is possible to say that the calculation is not sensitive to the assumptions on the penetration of the service, because the costs of the network are concentrated to the customer end. However, the calculation is very sensitive to the assumption on the average usage (hours/month) of the service.

**Keywords:** wireless local area network, wireless local loop

# Alkulause

Tämä diplomityö on tehty Telecom Finland Oy:n tutkimus- ja kehitysyksikössä Telekehityskeskuksessa. Haluan kiittää työn valvojaa apulaisprofessori Pertti Vainikaista ja työn ohjaajaa Pekka Linnaa saamistani neuvoista ja kommentteista.

Hyvistä korjauksista ja erityisen tarkasta oikoluvusta kiitokset kuuluvat Mika Laasoselle. Mielenterveyteni säilyttämisestä kiitokset sopivan kahjoille työkavereilleni ja ystävilleni, joiden ansioista tämä diplomityö on ollut mahdollista aina tarvittaessa unohtaa. Erityisen kiitoksen ansaitsee Mr. Arthur Guinness, jonka ansiosta sain hankittua voimaa palatakseni takaisin tietokoneen äärelle kaikkein heikoimpina hetkinäni.

Vanhempiani kiitän opiskeluni aikana saamistani henkisestä ja taloudellisesta tuesta, jota ilman opiskelijaelämä ei olisi ollut niin hauskaa kuin se nyt on ollut. Nyt on tullut aika jättää perustutkinto-opinnot taakse ja keskittyä mielenkiintoisten työtehtävien parissa jatkuvaan päättymättömään opiskeluun.

Helsingissä maaliskuun 12. päivänä 1996



Mika Keski-Heikkilä



# Sisällysluettelo

SISÄLLYSLUETTELO .....	i
SYMBOLILUETTELO .....	iii
LYHENNELUETTELO .....	iv
1 JOHDANTO .....	1
2 TAUSTAA LANGATTOMILLE LÄHIVERKOILLE .....	3
2.1 LÄHIVERKKOJEN STANDARDINTIORGANISAATIOITA .....	4
2.1.1 IEEE:n 802-komitea .....	4
2.1.2 ETSI:n RES .....	4
2.2 KANAVANVARAUSPROTOKOLLAT .....	5
2.2.1 CSMA/CD-kanavanvarausprotokolla .....	6
2.2.2 Valtuuden välitys (control token) .....	7
2.2.3 CSMA/CA -kanavanvarausprotokolla .....	7
2.2.4 EY-NPMA .....	8
2.3 HAJASPEKTRITEKNIikka LANGATTOMISSA LÄHIVERKOISSA .....	10
2.3.1 Hajotuskoodi .....	11
2.3.2 Auto- ja ristikorrelaatio .....	13
2.3.3 Koodausvahvistus .....	14
2.3.4 Modulaattorit ja modulaatiomenetelmät .....	14
3 LANGATON LÄHIVERKKO .....	15
3.1 IEEE 802.11 LANGATON LÄHIVERKKOSTANDARDI .....	16
3.1.1 IEEE P802.11 (draft) standardin fyysiset spesifikaatiot .....	16
3.2 ETSI ETS 300 328-STANDARDI (WIDEBAND DATA TRANSMISSION SYSTEMS) .....	18
3.3 ETSI HIPERLAN LANGATON LÄHIVERKKOSTANDARDI .....	18
3.3.1 HIPERLAN:in fyysinen kerros ja siirtoyhteyseros .....	20
3.4 AT&T:N WAVELAN LANGATON LÄHIVERKKOKORTTI .....	24
3.4.1 WaveLAN-kortin spesifikaatiot .....	24
3.4.2 WaveLAN-kortin rakenne .....	24
4 ERÄS RATKAISU LANGATTOMAN LÄHIVERKKOPALVELUN TARJOAMISEKSI .....	26
4.1 RATKAISUN KUVAUS .....	27
4.1.1 Taajuusmuuntimen ulkomuoto ja liitännät .....	28
4.1.2 Taajuusmuuntimen lohkokkaavio ja toiminta .....	28
4.2 RADIOYHTEYDEN SUUNNITTELUUN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ .....	31
4.2.1 Radioaaltojen vapaantilan eteneminen .....	31
4.2.2 Eri etenemismekanismien aiheuttamat häipymsilmiöt .....	33
5 LABORATORIOMITTAUKSET .....	35
5.1 WAVELAN-KORTILLE TEHDYT LABORATORIOMITTAUKSET .....	35
5.1.1 WaveLAN-lähi-verkkokortin spektrimuoto .....	35
5.1.2 Bittivirhesuhde (BER) ja pakettivirhesuhde (PER) .....	36
5.1.3 Vastaanottimen kynnystaso .....	37
5.1.4 Viereisen kanavan häiriönsieto .....	38
5.2 YLÖSSEKOITETUN SIGNAALIN SPEKTRIMUOTO .....	41
5.3 HÄIRIÖLÄHETTEET TAAJUUSKAISTAN ULKOPUOLELLE .....	42
5.4 TAAJUUSMUUNTIMEN SEKOITUSVAIMENNUS .....	43
5.5 PAIKALLISOSKILLAATTORILTA VAADITTAVA TAAJUUSSTABIILISUUS .....	45
5.6 VASTAANOTTIMEN KYNNYSTASO .....	45
5.7 TAAJUUSMUUNTIMEN KOHINALUKU .....	47

5.8 SUURIN SAAVUTETTAVA SOLUSÄDE TUKIASEMALTA LIITTYJÄLLE .....	47
<b>6 KUSTANNUSTARKASTELUJA .....</b>	<b>50</b>
6.1 VERKON TARJOAMAT PALVELUT .....	50
6.2 VELOITUS .....	51
6.3 VERKON RAKENNE .....	54
6.4 VERKON KOMPONENTTIEN KUSTANNUKSET .....	58
6.5 TULOKSET .....	60
6.6 TULOSTEN HERKKYYS PALVELUN PENETRAATION MUUTOKSELLE .....	63
6.7 TULOSTEN HERKKYYS PALVELUN KÄYTTÖTUNTIEN MÄÄRÄLLE KUUKAUDESSA .....	66
<b>7 JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>68</b>
<b>LÄHDELUETTELO .....</b>	<b>70</b>



## Symboliluettelo

$B_C$	Hajotuskoodin kaistanleveys
$B_S$	Signaalin kaistanleveys
$B_{SS}$	Hajaspektrimoduloidun signaalin kaistanleveys
$C$	Diskreetti 11-chippinen Barker-hajotuskoodi
$C(t)$	Hajotuskoodin aaltomuoto
$d$	Linkkiyhteyden pituus
$d_1, d_2$	Dominoivan esteen etäisyys linkkiyhteydellä
$D(t)$	Kanavakoodatun datan aaltomuoto
$f_c$	Kantoaallon taajuus
$f_{c,TE10}$	Aaltoputken katkوتاajuus $TE_{10}$ -aaltomuodolle
$f_{DRO}$	Dielektrisen resonaattorioskillaattorin taajuus
$f_{LO}$	Paikallisoskillaattorin taajuus
$\Delta f$	Viereisen kanavan kantaallon taajuusero signaalitaajuudesta
$\Delta f_{LO}$	Paikallisoskillaattorin suhteellinen taajuusstabiiliusvaatimus
$i$	Datapaketien lukumäärä HIPERLAN:in datakehyksessä
$k$	Tapahtumien lukumäärä
$L_0$	Vapaantilan vaimennus
$L_{sys,max}$	Maksimisysteemivaimennus
$M$	Lähettäjän prioriteetti HIPERLAN:ssa
$N$	Lähettäjän arpoma satunnaisluku HIPERLAN:ssa
$n$	Yhden datapaketin koko
$n_{as}$	Tukiaseman peittoalueella olevien potentiaalisten asiakkaiden lukumäärä
$n_s$	Tukiaseman sektoreiden lukumäärä
$n_{tal}$	Kotitaloustiheys neliökilometriä kohti
$P$	Pakettivirheen todennäköisyys
$p$	Bittivirheen todennäköisyys
$P(X=k)$	Poisson-jakautunut todennäköisyys
$R$	Tukiaseman säde
$r_{R,n}$	Fresnelin $n$ :nnen vyöhykkeen säde
$T_b$	Datasymbolin kesto
$T_c$	Hajotuskoodin symbolin kesto, chip-jakso
$\theta$	Odotusarvo
$\Psi(\tau)$	Autokorrelaatiofunktio

## Lyhenneluettelo

ACK	Acknowledgement	Kuittaus
ATM	Asynchronous Transfer Mode	Nopea tiedonsiirtotekniikka
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Summautuva valkoinen Gaussian-jakautunut kohina
BER	Bit Error Ratio	Bittivirhesuhde
BPSK	Binary Phase Shift Keying	Binäärinen PSK
BS	Base Station	Tukiasema
CDMA	Code Division Multiple Access	Koodijakomonikäyttöjärjestelmä
CSMA	Carrier Sense Multiple Access	
CSMA/CA	CSMA with Collision Avoidance	
CSMA/CD	CSMA with Collision Detection	
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying	Differentiaalinen QPSK
DS	Direct Sequence	Suorahajotus
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power	Säteilyteho verrattuna isotrooppiseen lähteeseen
ETR	ETSI Technical Report	ETSI:n tekninen raportti
ETS	ETSI Technical Standard	ETSI:n standardi
ETSI	European Telecommunications Standardisation Institute	Eurooppalainen telealan standardointijärjestö
EY-NPMA	Elimination, Yield - Non-Pre-emptive Priority Multiple Access	HIPERLAN:ssa käytetty kanavanvarausprotokolla
FCC	Federal Communications Commission	USA:n telehallintoviranomainen
FEC	Forward Error Coding	Siirtovirheitä korjaava koodaus
FH	Frequency Hopping	Taajuushypintä
FTP	File Transfer Protocol	Tiedostonsiirtoprotokolla
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying	
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying	
GOS	Grade Of Service	Palvelun laatu
HBR	High Bit Rate	HIPERLAN:n suuri bittinopeus
HIPERLAN	High Performance Local Area Network	Suurinopeuksinen ETSI:n langaton lähiverkkostandardi
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineer	Sähkö- ja elektroniikkainsinöörien järjestö
IP	Internet Protocol	Internetin yhteyskäytäntö
IRR	Internal Rate of Return	Investoinnin sisäinen korkokanta
ISDN	Integrated Services Digital Network	Digitaalinen monipalveluverkko
ISM	Industrial, Scientific and Medical	2400 - 2500 MHz alueella oleva taajuusalue



ISO	International Standards Organisation	Kansainvälinen standardisointi organisaatio
LAN	Local Area Network	Lähiverkko
LBR	Low Bit Rate	
LNA	Low Noise Amplifier	Pienikohinainen vahvistin
LOS	Line-Of-Sight	Näköyhteys
MAC	Medium Access Control	Kanavanvarausprotokolla
MCA	Micro Channel Architecture	Mikrokanava
NPV	Net Present Value	Investoinnin nykyarvo
OSI	Open Systems Interconnection	
PCMCIA	Personal Computer Memory Card Interface Association	Kannettaviin tietokoneisiin kehitetty pienikokoinen lisäkorttipaikka
PER	Packet Error Ratio	Pakettivirhesuhde
PG	Processing Gain	Koodausvahvistus
PN	Pseudo Noise	Valekohina
PPM	Parts Per Million	Miljoonasosa
PSK	Phase Shift Keying	Vaihesiirtoavainnus
PSTN	Public-Switched Telephone Network	Yleinen piirikytkentäinen puhelinverkko
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Kvadratuurinen PSK
RLAN	Radio Local Area Network	Langaton lähiverkko
SNR	Signal to Noise Ratio	Signaalikohinasuhde
SSB	Single Side Band	Yksipuoleinen sivukaista
TDD	Time Division Duplex	Aikajakodupleksointi
TDMA	Time Division Multiple Access	Aikajakomonikäyttöjärjestelmä
TH	Time Hopping	Aikahypintä
TITAN	Tool for Introduction scenarios and Techno-economic evaluation of Access Networks, RACE 2087	Liityntäverkkojen tekno-ekonomisten kustannusten laskentatyökalu, RACE 2087
WLAN	Wireless Local Area Network	Langaton lähiverkko
WWW	World Wide Web	

TKK SÄHKÖTEKNIKA  
OSASTON KIRJASTO  
OTAKAARI 5 A  
02150 ESPOO

## 1 JOHDANTO

---

Langattomien lähiverkkojen kehitys on ollut viime vuosina nopeaa ja niiden merkitys tulee lähivuosina yhä kasvamaan. Erityisen nopeasti on kehittynyt langattomien lähiverkkokorttien tekniikka ja integraatio, nykyinen langaton lähiverkkokortti lähettämiseen ja vastaanottamiseen sopii kannettavissa tietokoneissa käytettyihin PCMCIA-korttipaikkoihin. Tuotteiden hinta tulee laskemaan lähivuosina voimakkaasti langattomien lähiverkkostandardien valmistumisen myötä.

Langattomat lähiverkkokortit tarjoavat nopean, edullisen ja joustavan tavan rakentaa lähiverkko. Langaton ratkaisu säästää hankalissa olosuhteissa ja laajoissa teollisuushalleissa kalliin ja aikaavievän kaapeloinnin. Kannettavat tietokoneet voidaan kytkeä vaivattomasti toimiston langallisen lähiverkon yhteiselle tulostimelle. Verkko on myös erittäin joustava, uusia päätelaitteita voidaan poistaa ja lisätä lähiverkkoon verkon toiminnan siitä häiriintymättä. Toisaalta yhteys radiotiellä on altis erilaisille häiriöille, verkon siirtonopeus on ainakin toistaiseksi langallisia lähiverkkoja hitaampi ja langattomien lähiverkkojen kantama sisätiloissa on ainoastaan muutamia kymmeniä metrejä.

Tässä työssä esitellään nykyään jo olemassa olevia ja lähitulevaisuudessa markkinoille tulevia langattomia lähiverkkoja, niiden rakennetta ja toimintaa sekä langattomien lähiverkkojen standardeja ja standardien valmistumisaikataulua. Erityisesti työssä tutkitaan näiden lähiverkkokorttien käyttämistä tarjoamaan langatonta lähiverkkoliityntää kuluttajalle.

Ongelmana on käytetyllä taajuusalueella rajoitettu maksimilähetysteho (EIRP) ja tästä seuraava liian pieni solun säde palvelulle. Tämän ongelman ratkaisuna diplomi-insinööri Pekka Linna Telecom Finland Oy:n tutkimus- ja kehitysyksiköstä kehitteli idean, jossa lähiverkkokorttien ulostulosignaali on siirretty taajuusalueessa suuremmalle taajuudelle resiprookkisella sekoittimella. Näin saavutetaan riittävän suuri solunsäde suuntaavien antennien antennivahvistusten avulla ja säilytetään silti etu käyttää halpoja standardoituja lähiverkkokortteja palvelun tarjoamiseen. Tässä



työssä on tutkittu idean käytännön toteutusta ja sen toimivuutta laboratorio-olosuhteissa.

Työssä esitellään aluksi langattoman lähiverkkoliittynän rakenne ja verkon toteutus. Tätä työtä varten rakennetun taajuusmuuntimen ominaisuuksia mittaamalla pyritään selvittämään idean toimivuutta laboratorio-olosuhteissa. Muuntimesta mitataan spektrin muotoa, sekoitusvaimennuksia ja minimiherkkyystasoa. Mitattujen tietojen perusteella lasketaan suurin saavutettava solun säde. Saatujen tietojen perusteella ja palveluista ja verkon rakenteesta tehtyjen oletusten perusteella arvioidaan sekoittimen tavoitehintaa, joka mahdollistaisi kaupallisesti kannattavan palvelun tarjoamisen. Tehdyille oletuksille palvelun penetraatiokehityksestä ja palvelun keskimääräisestä kuukausittaisesta käyttötuntimäärästä tehdään myös herkkyysanalyysi, jossa tarkastellaan liityntäverkon takaisinmaksuajan herkkyyttä näiden oletusten muutokselle.

## 2 TAUSTAA LANGATTOMILLE LÄHIVERKOILLE

Lähiverkkojen menestystarina alkaa 70-luvun puolivälistä, kun IEEE 802-komitea julkaisi ensimmäisen lähiverkkostandardin (LAN, Local Area Network). Standardi oli IEEE 802.3 CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), joka tunnetaan paremmin tuotenimellä Ethernet. Myöhemmin standardoitiin myös vaihtoehtoisia ratkaisuja, kuten Token Bus (IEEE 802.4) ja Token Ring (IEEE 802.5). Näiden tuotteiden menestys on suurelta osin standardoinnin ansiota ja tällä hetkellä toimistoissa ja tehtaissa on miljoonia näihin standardeihin perustuvia lähiverkkoja.

*Taulukko 1. Yleisimmät käytössä olevat lähiverkkostandardit [1].*

LAN standardi		Siirt nopeus	Kuvaus
IEEE 802.3 CSMA/CD (Ethernet)	10 Base 2	10 Mbit/s	Ohut koaksiaalikaapeli (d=0,25''), yhden segmentin maksimipituus noin 200 m. Verkkorakenne on väylä.
	10 Base 5	10 Mbit/s	Paksu koaksiaalikaapeli (d=0,5''), yhden segmentin maksimipituus noin 500 m. Verkkorakenne on väylä.
	10 Base T	10 Mbit/s	Suojaamaton kierretty pari (UTP, Unshielded Twisted Pair). Verkkorakenne on tähtimäinen.
IEEE 802.5 Token Ring		4 Mbit/s tai 16 Mbit/s	Verkkorakenne on rengas, jossa kierrätetään lähetysoikeutta (token).

Nykyiset lähiverkot on suunniteltu kytkemään toisiinsa samassa rakennuksessa tai samassa kerroksessa olevia palvelimia, tietokoneita, piirtureita, tulostimia jne. Niiden fyysinen etäisyys on rajoitettu muutama sataan metriin ja tiedonsiirtonopeus on tyypillisesti noin 10 Mbit/s.



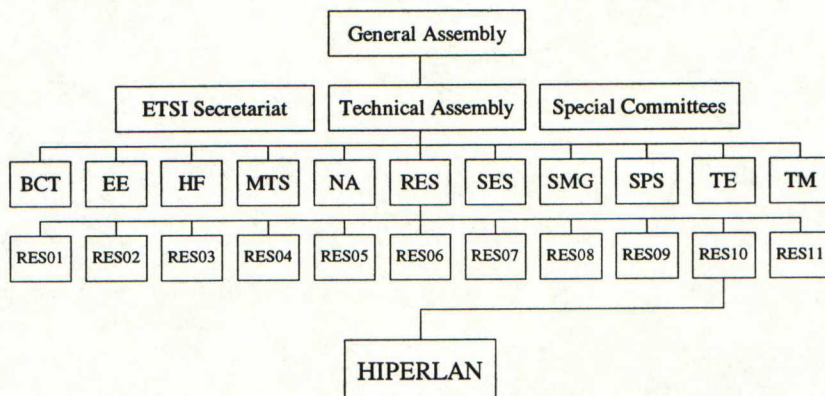
## 2.1 Lähiverkkojen standardointiorganisaatioita

### 2.1.1 IEEE:n 802-komitea

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineer) aloitti lähiverkkojen standardoinnin 1970-luvun alkupuolella, jolloin lähiverkot alkoivat kehittyä erittäin voimakkaasti. IEEE julkaisi 802-standardisarjansa lähiverkoille, nämä standardit on myöhemmin otettu suoraan kansainväliseksi ISO-standardiksi (International Standards Organisation).

### 2.1.2 ETSI:n RES

ETSI (European Telecommunications Standards Institute) on eurooppalainen telealan standardointiorganisaatio. ETSI:ssä langattomia lähiverkkoja käsitellään teknisessä komiteassa (TC, Technical Committee) nimeltä TC Radio Equipment and Systems (RES).



*Kuva 1. ETSI:n standardointiorganisaation rakenne vuonna 1996 ja tulevaisuuden langattoman lähiverkkostandardin HIPERLAN:n sijainti siinä.*

ETSI:n standardointityön rakenne ja HIPERLAN:in sijainti siinä on esitetty kuvassa 1. ETSI:n kehittämä HIPERLAN-standardi on tulevaisuuden langaton lähiverkkostandardi, jolla on suuria potentiaalisia mahdollisuuksia maailmanlaajuisesti standardiksi. Ylintä päätösvaltaa ETSI:n organisaatiossa käyttää yleiskokous (GA, General Assembly), jonka alla teknistä koordinaatiota varsinaista standardointityötä tekevien teknisten komiteoiden välillä hoitaa TA (Technical Assembly). Teknisistä komiteoista tunnetuin lienee TC SMG (Special Mobile

Group), joka on vastuussa GSM- ja DCS1800-matkaviestinjärjestelmien standardoinnista ja kehittämisestä.

## 2.2 Kanavanvarausprotokollat

Kun kahden päätelaitteen välille avataan tiedonsiirtoyhteys tähtimäisessä (star) verk-  
korakenteessa, verkkoa kontrolloiva elementti huolehtii tiedonsiirtoväylän varaami-  
sesta ja ylläpitämisestä yhteyden keston aikana (esimerkiksi puhelinkeskus yleisessä  
puhelinverkossa, PSTN). Väylä- (bus) ja rengasrakenteisissa (ring) tiedonsiirto-  
verkossa tämä ei ole kuitenkaan mahdollista, koska käytössä on vain yksi looginen  
tiedonsiirtoväylä kahden päätelaitteen välillä. Tästä syystä tarvitaan kanavanvaraus-  
protokolla huolehtimaan tämän yhteisen median jakamisesta väylään tai renkaaseen  
liittyneiden päätelaitteiden kesken.

Langallisissa lähiverkoissa on kaksi protokollaa, joita käytetään yleisimmin tiedon-  
siirtoväylän jakamiseen. Nämä ovat CSMA/CD (Carrier-Sense-Multiple-Access with  
Collision Detection) ja valtuuden välitys (control token). Väylärakenteinen  
CSMA/CD-järjestelmä tunnetaan paremmin tuotenimellä Ethernet. CSMA/CD:tä  
käytetään yksinomaan väylärakenteisissa tiedonsiirtoverkoissa. Valtuuden välitystä  
käytetään sekä rengas- että väylärakenteisissa tiedonsiirtoverkoissa, näistä tunne-  
tuimmat järjestelmät ovat Token Ring ja Token Bus.

Langaton lähiverkko on yleensä väylärakenteinen, siinä päätelaitteet jakavat tiedon-  
siirtojärjestelmälle varatun yhden yhteisen taajuuskaistan keskenään. Yleisesti  
langattomissa lähiverkoissa tarvitaan tehokkaammin datapakettien törmäyksiä  
radiokanavassa ehkäisevä kanavanvarausprotokolla kuin langallisissa lähiverkoissa.  
Tällä hetkellä 2,4 GHz:n taajuudella yleisesti käytössä oleva protokolla on  
CSMA/CD:stä kehittynyt CSMA/CA (Carrier-Sense-Multiple-Access with Collision  
Avoidance). Toinen kanavanvarausprotokolla, joka on tulossa käyttöön HIPERLAN-  
standardin mukaisissa langattomissa lähiverkkokorteissa on EY-NPMA (Elimination,  
Yield - Non-Pre-emptive Priority Multiple Access).



### 2.2.1 CSMA/CD-kanavanvarausprotokolla

CSMA/CD-kanavanvarausprotokollaa käytetään yksinomaan väylärakenteisissa verkoissa. IEEE:n standardoima 802.3 CSMA/CD lähiverkkoratkaisu tunnetaan paremmin kansanomaisemmalla tuotenimellä Ethernet. Väylärakenteisessa lähiverkossa kaikki päätelaitteet on kytketty samaan kaapeliin, joka voi olla koaksiaalinen-, pari- tai valokuitukaapeli.

Protokollassa lähetystä yrittävä päätelaite kuuntelee kanavaa ennen lähetystä (Carrier Sense, CS). Jos se havaitsee liikennettä kanavalla, lähetysyritystä siirretään, kunnes kanava on vapaa. Signaalin äärellisestä etenemisnopeudesta johtuen kanavassa voi kuitenkin tapahtua kahden samanaikaisen lähetyksen yhteentörmäys. Tämän vuoksi päätelaite kuuntelee eli monitoroi kanavaa samanaikaisesti lähetyksen aikana. Lähetettävällä datakehyksellä on minimikesto aika, joka varmistaa sen, että lähetysignaali ei ehdi päättyä ennen kuin se on ehtinyt verkon kauimmaisena olevaan pisteeseen ja takaisin. Tämä yhden kehyksen minimikesto aika on siis

$$\text{Kehyksen kesto} = 2 * (\text{kulkuajaviive}) + (\text{varmuusmarginaali}) \quad (1)$$

Jos monitoroitu ja lähetetty signaali ovat erilaisia, tulkitaan, että kanavalla on tapahtunut törmäys. Varmistaakseen, että kaikki muutkin tiedonsiirtoyritykseen osalliset päätelaitteet ovat tietoisia törmäyksestä, päätelaite jatkaa lyhyen ajan satunnaisen bittijonon (jam sequence) lähetystä. Näin yhteentörmäys on havaittu (Collision Detection, CD) lähetyksen korruptoitumisena ja päätelaitteiden täytyy uusia lähetyksen määrätyn satunnaisen ajan kuluttua.

Kanavalle pääsy CSMA/CD-järjestelmässä perustuu todennäköisyyteen ja on riippuvainen kanavan kuormituksesta. Langallisissa lähiverkoissa siirtonopeus on kuitenkin suuri (10 Mbit/s), joten törmäyksen todennäköisyys vähän kuormitetussa verkossa on käytännössä hyvin pieni.

CSMA/CD:n käyttö radiojärjestelmissä edellyttää, että kaikki ala-asemat ovat kantaman etäisyydellä toisistaan. Ongelmana on radiokanavalla esiintyvät häipymät ja muut häiriöt, joiden takia jokin asema saattaa olla hetkellisesti kantaman ulkopuolella, eikä näin havaitse lähetystä.



### 2.2.2 Valtuuden välitys (*control token*)

Kanavalle pääsyä voidaan kontrolloida myös kierrättämällä lähetysoikeutta (token) päätelaitteiden välillä. Tällöin verkkorakenne voi olla joko väylä- tai rengasrakenteinen. Väylärakenteisessa verkossa voidaan määrittää looginen rengas, jossa valtuus kiertää. IEEE:llä on standardi molemmista verkkorakenteista, järjestelmät tunnetaan nimellä IEEE 802.4 Token Bus ja IEEE 802.5 Token Ring. Näistä Token Ring on selvästi yleisemmin käytössä, mutta monimutkaisempaan ja kalliimpaan se ei ole pärjännyt kilpailussa suosioista Ethernetille.

Valtuuden välitys tarjoaa hyvin joustavan verkkoratkaisun. Väylärakenteisessa verkossa kaikkien verkkoon liittyvien päätelaitteiden ei välttämättä tarvitse olla loogisessa valtuuden kierrätysrenkaassa. Tällöin päätelaite on ainoastaan vastaanottava. Valtuuden välitys tarjoaa myös mahdollisuuden määritellä prioriteetteja eri päätelaitteille.

Radioverkkoihin valtuuden välitys soveltuu huonosti. Lähetysoikeus saattaa tilapäisen häipymän tai voimakkaan häiriösignaalin seurauksena kadota, jolloin järjestelmä on käyttökelvoton niin kauan, kunnes verkonhallinta havaitsee tapahtuneen. Lähetysoikeus saattaa häiriöiden takia joutua myös väärään verkkoon.

### 2.2.3 CSMA/CA -kanavanvarausprotokolla

CSMA/CA (Collision Avoidance) on kehitetty CSMA/CD:stä (Collision Detection). Suurimpana erona näiden protokollien välillä on, että CSMA/CA:ssa kanavaa ei kuunnella lähetyksen yhteydessä, vaan lähettäjä odottaa vastaanottajalta kiittoa (ACK). Jos kiittoa ei tule tietyn ajan kuluessa, asema lähettää paketin uudestaan. CSMA/CA on käytössä erityisesti radiojärjestelmissä. Törmäysten havainnointi radiokanavassa on teknisesti huomattavasti vaikeampaa ja vie pitemmän ajan kuin langallisissa järjestelmissä, eikä rajallista taajuuskaistaa ole varaa käyttää tähän. Törmäysten välttämiseksi on tehty kompromissi taajuuskaistan käytön ja siirtonopeuden välillä, radiojärjestelmissä rajallisen taajuuskaistan käyttö on vienyt voiton siirtonopeudesta.

CSMA/CA on käytössä tällä hetkellä useissa ISM (Industrial, Scientific and Medical) -taajuusalueella (Euroopassa ja USA:ssa taajuuskaista 2400 - 2500 MHz) toimivissa



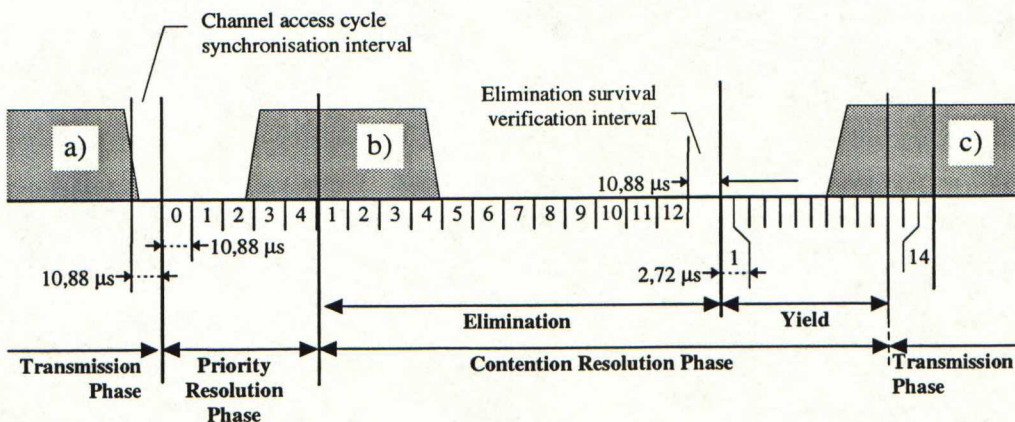
langattomissa lähiverkoissa (esimerkiksi AT&T:n WaveLAN). Se on myös todennäköisin valinta vuoden 1996 alussa valmistuvaan langattomien lähiverkkojen standardiin IEEE 802.11.

### 2.2.4 EY-NPMA

ETSI:n HIPERLAN:n kanavanvarausmenetelmäksi on standardoitu mekanismi nimeltään EY-NPMA (Elimination, Yield - Non-Pre-emptive Priority Multiple Access). Tässä kanavanvaraus-menetelmässä erotetaan kolme eri vaihetta:

1. Prioriteetin erotteluvaihe (Priority resolution phase)
2. Sisällön erotteluvaihe (Contention resolution phase)
  - Eliminointivaihe (Elimination phase)
  - Saantovaihe (Yield phase)
3. Lähetysvaihe (Transmission phase)

Kuvassa 2 on esitetty tätä kanavanvarausmenetelmää esittävä kuva.



Kuva 2. EY-NPMA kanavanvarausmenetelmä, a) edellisen lähetyksen datapaketti, b) eliminointipurske, c) lähetettävä datapaketti.

Jos kanava on ollut vapaa vähintään 1700 kellojaksoa (72,25 μs), kanava todetaan vapaaksi ja siirrytään suoraan lähetysvaiheeseen kolme. Jos kanava ei ole vapaa, on aluksi synkronoiduttava edelliseen lähetettyyn pakettiin. Lähetystä yrittävän päätelaitteen on synkronoiduttava edellisen lähetyksen lopusta 256 kellojakson



(10,88  $\mu$ s) päähän  $\pm 10$  kellojakson tarkkuudella. Tämän ansiosta kaikki lähetystä yrittävät päätelaitteet ovat synkronissa toisiinsa ja kanavanvarausprotokollan mukainen proseduuri voidaan aloittaa.

Vaiheessa yksi (Priority resolution phase) lähetystä yrittävä kuuntelee kanavaa M aikaväliä, aikavälin kesto on 256 kellojaksoa eli 10,88  $\mu$ s. Tässä M on lähettäjän prioriteetti, jonka arvo vaihtelee nollasta neljään ( $0 \leq M \leq 4$ ). Arvo  $M=0$  merkitsee korkeinta prioriteettiä, arvo  $M=4$  matalinta prioriteettia. Jos lähetystä yrittävä kuulee kanavalla lähetyksen, se merkitsee, että jollakin muulla lähetystä yrittävällä on korkeampi prioriteetti. Tällöin lähetystä yrittävä vetäytyy kilpailusta, koska sillä ei ole tarpeeksi suurta prioriteettia lähetykseen.

Seuraavassa vaiheessa, vaiheessa kaksi (Contention resolution phase) ainoastaan saman prioriteetin lähettäjiä on kanavalla, koska alemmat prioriteetit ovat tippuneet pois kilpailusta. Lähetyslupaa yrittävä päätelaite lähettää eliminointipurskeen heti, kun sen laskurin arvo M on nollautunut (Elimination phase). Tämän eliminointipurskeen kesto riippuu yrittäjän itsensä arpomasta satunnaisluvusta N, ja ratkaisee tämän vaiheen voittajan. Arvo N vaihtelee nollasta kahteentoista ( $0 \leq N \leq 12$ ), nollan ollessa lähetyksen kestoltaan kaikkein lyhin. Jos lähetin kuulee kanavalla liikennettä oman lähetyksensä loputtua, se vetäytyy kilpailusta. Siis suurimman arvon itselleen arponut voittaa vaiheen kaksi.

Teoriassa vieläkin on mahdollista, että useampi kuin yksi lähetin pääsee läpi, joten tämän jälkeen järjestetään toinen samanlainen kilpailu (Yield phase). Nyt mahdollisuus useamman kuin yhden lähettimen pääsyyn kanavalle on erittäin epätodennäköistä, joten lähetin siirtyy lähetysvaiheeseen kolme (Transmission phase).

EY-NPMA kanavanvarausmekanismin pääominaisuus on, että siinä lähetystä yrittävä päätelaite lähettää muuttuvan pituisen datapurskeen. Tämä arvottavasta satunnaisluvusta riippuva lähetettävän datapurskeen kesto määrää kanavanvarauskilpailun voittajan. Protokolla estää tehokkaasti pakettien törmäykset kanavassa, ja sopii hyvin käytettäväksi radiojärjestelmissä.



### 2.3 Hajaspektritekniikka langattomissa lähiverkoissa

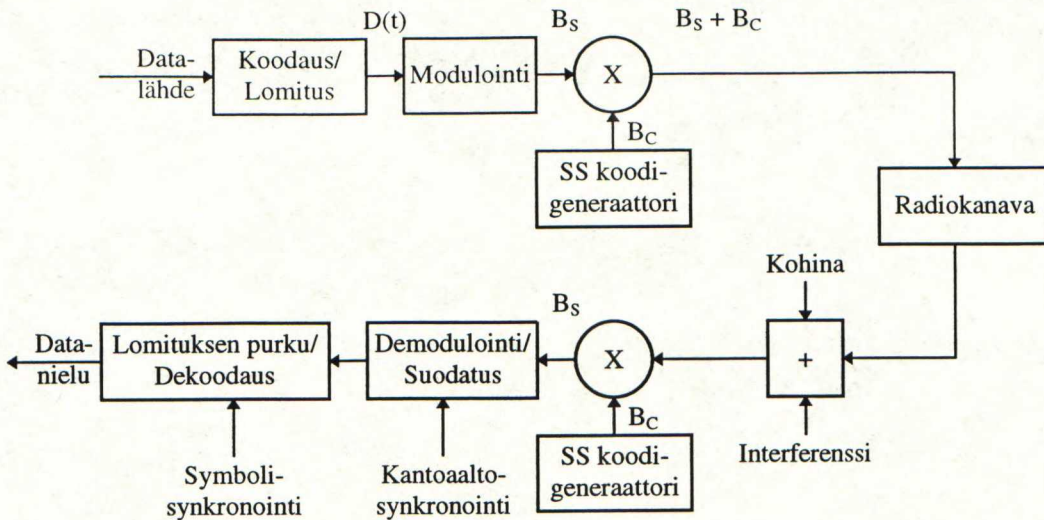
Hajaspektritekniikkaa käytetään 2,4 GHz:n ISM-alueella toimivissa langattomissa lähiverkoissa pienentämään taajuuskaistalla esiintyvien häiriösignaalien vaikutusta. Hajaspektrijärjestelmän käyttö parantaa myös sisätiloissa voimakkaana esiintyvän monitie-etenemisen sietokykyä.

Hajaspektrijärjestelmissä radiokanavaan lähetetyn signaalin kaistanleveys on huomattavasti suurempi kuin alkuperäisen informaatio-signaalin kaistanleveys. Tehon levittäminen voidaan toteuttaa suoralla hajotuksella (DS, Direct Sequence), taajuushypinnällä (FH, Frequency Hopping), aikahypinnällä (TH, Time Hopping), pulssitetulla taajuusmodulaatiolla (Chirp Modulation) tai näiden eri tapojen yhdistelmillä (Hybrid) [2]. Tässä keskitytään suora-hajotusta käyttävään hajaspektrijärjestelmään.

Suora-hajotukseen perustuvan hajaspektritekniikan merkittävimpiä etuja hajaspektritekniikkaa käyttämättömiin järjestelmiin verrattuna on sen kapeakaistaisten häiriösignaalien ja kohinan parempi sietokyky. Nämä häiriöt ovat suuri ongelma langattomien lähiverkkojen toiminnalle 2,4 GHz:n ISM-alueella. Suora-hajotusta käyttävät järjestelmät sietävät myös monitie-etenemistä, niiden korrelaattori synkronoidaan aina suurimpaan monitiekomponenttiin ja muiden komponenttien vaikutus on likimain sama kuin AWGN-kohinalla (Additive White Gaussian Noise). Hajaspektrijärjestelmistä suora-hajotus (DS) onkin tällä hetkellä yleisemmin käytetty menetelmä kuin taajuushyppely (FH), jota käytetään myös langattomissa lähiverkoissa 2,4 GHz:n taajuudella. Tällä hetkellä suora-hajotukseen perustuvat ratkaisut tarjoavat suurempaa bittinopeutta ja toimintasädettä kuin taajuushyppelyyn perustuvat laitteet.

Hajaspektrimodulaatiota käyttävässä järjestelmässä keskeisiä vaiheita ovat valesatunnaisten (PN, Pseudo Noise) hajotuskoodin generointi, informaatio-signaalin modulointi lähettimessä ja lähetteen korrelointi vastaanottimessa.





Kuva 3. Yleinen hajaspektrimoduloidun systeemin lohkokaavio [3].

Yksinkertaistettu lohkokaavio kuvassa 3 esittää yleisen suoraohajotusta käyttävän kommunikaatiolinkin, joka käytännössä voi erota tästä huomattavasti. Tässä digitaalinen kantataajuinen informaatio on lähetyspäässä kanavakoodattu ja moduloitu. Tämän jälkeen signaali kerrotaan valesatunnaisella hajotuskoodilla, joka on myös moduloitu samalla modulaatiomenetelmällä kuin signaali. Symbolit  $B_S$  ja  $B_C$  edustavat signaalin ja hajotuskoodin kaistanleveyttä merkityissä pisteissä. Käytännössä signaalia ei yleensä moduloida hajotuskoodilla, kuten kuvassa on esitetty modulaatio-demodulaatiokäsitteen yksinkertaistamiseksi, vaan informaatio-signaali on summattu (modulo-2) hajotuskoodin kanssa.

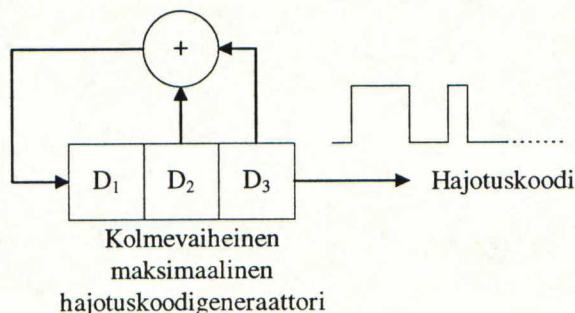
### 2.3.1 Hajotuskoodi

Käytettävä hajotuskoodi, sen tyyppi, pituus ja nopeus (chip-rate) määrää suurelta osin hajaspektrijärjestelmän ominaisuudet. Eri hajotuskoodeilla voidaan vaikuttaa järjestelmän häiriön- ja kohinansietokykyyn ja tiedon salaukseen. Hajotuskoodit jaetaan kahteen ryhmään, lineaarisiin ja epälineaarisiin. On huomattava, että yleisemmin käytössä olevat lineaarisiin hajotuskoodeihin perustuvat hajaspektrijärjestelmät eivät tarjoa tietoturvallisuutta sinällään, lineaariset hajotuskoodit on aina mahdollista purkaa. Tietenkin itse lähetettävä data on aina mahdollista salata salausalgoritmeilla, kuten nykyisissä digitaalisissa matkaviestinjärjestelmissä. Epälineaarisia hajotuskoodeja käytetään lähinnä



sotilassovellutuksissa eivätkä ne kovin hyvin sovellu käytettäväksi siviilitietoliikenteessä.

Lineaarinen hajotuskoodigeneraattori rakentuu viive-elementtien, lineaaristen summaimien ja takaisinkytkennän yhdistelmästä. Viive-elementteinä käytetään yleisimmin digitaalisia piirejä, kuten kiikkuja tai siirtorekistereitä.



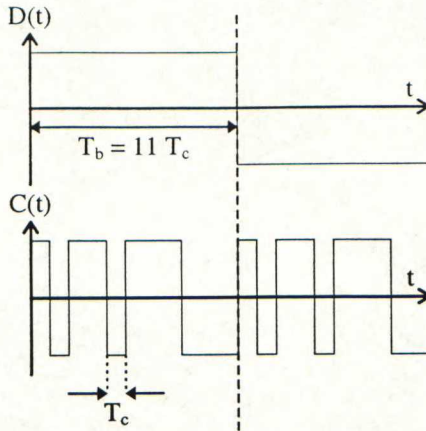
Kuva 4. Esimerkki kolmella viive-elementillä toteutetusta hajotuskoodigeneraattorista.

Pisin generoitava hajotuskoodi (maksimaalinen), joka voidaan generoida  $n$  kappaletta viive-elementtejä sisältävästä generaattorista on  $2^n - 1$  chip-jaksoa pitkä. Täten kuvan 4 koodigeneraattorista saadaan maksimissaan  $2^3 - 1 = 7$  jaksoa pitkä koodi.

Kuvassa 5 on esitetty datan (tai kanavakoodatun datan)  $D(t)$  ja hajotuskoodin  $C(t)$  aaltomuoto. Datasymbolin kesto on  $T_b$  ja hajotuskoodilla yhden symbolin kesto (chip-jakso) on  $T_c$ . Kuvassa oleva hajotuskoodi on 11-chippinen Barker-koodi (Barker sequence [4]), joka diskreettinä signaalina on

$$C = [ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 ]$$

Tämän valesatunnaisten Barker-hajotuskoodin  $C(t)$  ja varsinaisen datan  $D(t)$  aaltomuodot on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 5. Datan ja valesatunnaisen hajotuskoodin (11-chip) aaltomuodot.

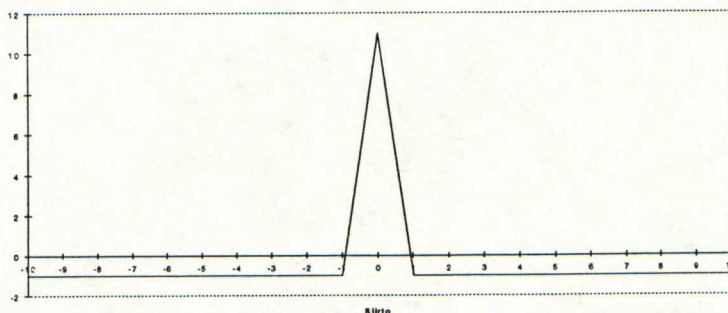
### 2.3.2 Auto- ja ristikorrelaatio

Hajotuskoodeilla on kaksi tärkeää ominaisuutta: autokorrelaatio ja ristikorrelaatio. Autokorrelaatio tarkoittaa vaihesiirtyneen koodin korrelaatiota itsensä kanssa. Yleisesti autokorrelaatio määritellään integraaliksi

$$\Psi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} C(t)C(t-\tau)dt \quad (2)$$

joka on signaalin integraali sen kaikkien vaihesiirtymien  $(t-\tau)$  yli ja jossa  $\Delta t$  on yhden chip-jakson kesto.

Barker-koodilla on ominaisuus, että se korreloi itsensä kanssa (autokorrelaatio) ainoastaan täydellisessä synkronissa. Tämä helpottaa vastaanottimen DS-hajotuksen purkavan korrelaattorin signaalin tunnistusta. Tämä on yhteistä kaikille lineaarisille maksimaalisille koodeille. Barker-koodin (11-chip) autokorrelaatio on esitetty seuraavassa kuvassa 6.



Kuva 6. Barker-koodin (11 chip) autokorrelaatio.



Ei-maksimaalisilla koodeilla on usein pieniä autokorrelaatiopiikkejä. Toinen koodien tärkeä ominaisuus on ristikorrelaatio, joka tarkoittaa koodin korrelaatiota muiden koodien kanssa. Matkapuhelinjärjestelmissä käytössä olevissa koodijakomonikäyttöjärjestelmissä (CDMA, Code Division Multiple Access) yritetään löytää koodeja, joiden ristikorrelaatio olisi mahdollisimman vähäistä.

### 2.3.3 Koodausvahvistus

Koodausvahvistus (Processing Gain, PG) suoraan suhteuttaa käytävissä hajaspektri-järjestelmissä määritellään lähetettävän hajaspektrimoduloidun RF-signaalin radio-kanavassa olevan kaistanleveyden  $B_{SS}$  suhteena alkuperäisen informaationsignaalin kaistanleveyteen  $B_S$ . Oletettaessa kantataajuisen informaation spektrin olevan keskitynyt nollataajuuden ympärille, sen kaistanleveys ilmoitetaan yksipuoleisena ja on suoraan verrannollinen siirrettävän informaation siirtonopeuteen  $R$  [bit/s]. Koodausvahvistus  $PG$  olisi tällöin

$$PG = B_{SS}/B_S \quad (3)$$

### 2.3.4 Modulaattorit ja modulaatiomenetelmät

Balansoitu modulaattori on yleisesti käytetty rakenne kaikissa järjestelmissä, joissa hyvä isolaatio sisääntulosignaalien ja ulosmenosignaalin välillä on välttämätöntä. Yleisin käytössä oleva modulaatiomenetelmä on nelivaiheinen modulaatio, esimerkiksi QPSK. Tyypillinen DQPSK-modulaattorin lohkokaavio on esitetty AT&T:n WaveLAN-lähettimen lohkokaaviossa kuvassa 11. Kaksi suurinta etua nelivaiheisessa modulaatiossa kaksivaiheiseen modulaatioon verrattuna ovat signaalin suurempi interferenssihäiriön sietokyky epälineaarisissa systeemeissä ja kaksinkertainen datan siirtonopeus samassa taajuuskaistassa.

### 3 LANGATON LÄHIVERKKO

---

Nykyiset langattomat lähiverkot toimivat pääsääntöisesti 2,4 GHz:n ISM-taajuusalueella. Siirtonopeus näissä verkoissa on tyypillisesti 2 Mbit/s. Toimintasädesisätiloissa on noin 50 metriä riippuen rakennuksesta. Paksuseinäisessä kivitalossa kantama jää paljonkin tämän alle, avotoimistossa kantama taas voi olla suurempikin. Näköyhteydellä ulkotiloissa kantama jää kuitenkin noin 200 metriin.

Langatonta lähiverkkoa ei ole tarkoitettu korvaamaan olemassa olevia langallisia lähiverkkoja, vaan täydentämään niitä. Tärkeimpiä langattomien lähiverkkojen käyttökohteita tällä hetkellä ovat

- Kannettavien tietokoneiden liittäminen olemassa olevaan lähiverkkoon. Tärkein sovellus, poistaa hankalien kaapeleiden kytkemistarpeen.
- Langallisen verkon vaihtoehto, usein edullisempi vaikeissa olosuhteissa ja suurissa teollisuushalleissa ja marketeissa.

Langattomien lähiverkkokorttien integraatio on edennyt jo niin pitkälle, että koko kortti lähettimiseen ja vastaanottamiseen sopii nykyisiin PCMCIA-standardin mukaisiin korttipaikkoihin. Nämä kannettaviin tietokoneisiin sopivat PCMCIA-lähiverkkokortit tuovat suurta joustavuutta paljon kannettavien tietokoneiden kanssa töitä tekeville. Yrityksen myyntiedustaja voi esimerkiksi toimistossa käydessään asettua jonnekin tukiaseman läheisyyteen, ottaa yhteyden lähiverkkoon ja tulostaa myyntidokumentin lähiverkkoon kytketylle tulostimelle.

Toinen varsin yleinen langattomien lähiverkkojen käyttökohde ovat teollisuushallit, varastot ja suuret marketit. Näissä kohteissa tarvitaan varsin usein kannettavia tietokoneita ja lähiverkkopalveluja eikä isojen teollisuushallien ja supermarkettien kaapeloiminen ole taloudellisesti kannattavaa. Kannettavaan tietokoneeseen liitetty langaton lähiverkkokortti ja langaton lähiverkko tuovat erinomaista joustavuutta työskentelyyn esimerkiksi inventaarion teossa.

Tarkemmin langattomien lähiverkkojen ominaisuuksia on käsitelty viitteessä [5].



### 3.1 IEEE 802.11 langaton lähiverkkostandardi

Jatkona menestyksellä langallisille lähiverkkostandardeilleen IEEE 802-komitea aloitti myös langattomien lähiverkkojen standardointityön. Standardia kehitetään yhteistyössä Yhdysvaltojen, Japanin ja Euroopan kesken. Ensimmäiset luonnokset langattomien lähiverkkojen standardista IEEE 802.11 julkaistiin syksyllä 1993. Langattomien lähiverkkojen standardin arvioidaan valmistuvan vuoden 1996 alkupuolella.

Standardi määrittelee 2,4 GHz ISM-kaistalla toimivat suoraohjaukseen (DS) ja taajuushyppelyyn (FH) perustuvat hajaspektrijärjestelmät sekä infrapunälähiverkot. Siirtonopeudeksi on määritelty 1-2 Mbit/s ja suurin sallittu lähetysteho (EIRP, Equivalent Isotropically Radiated Power) on rajoitettu. Euroopassa se on 100 mW (20 dBm) ja USA:ssa 1000 mW.

Standardi määrittelee käytettävän kanavanjakoprotokollan eli MAC-kerroksen (Medium Access Control) ja langattoman lähiverkkokortin fyysisen kerroksen.

Tällä hetkellä markkinoilla on useita valmistajakohtaisia tuotteita, jotka noudattelevat ISM-alueelle olemassa olevia 2,4 GHz standardiluonnoksia ja standardeja. Lähiverkkokorttien hinta tulee standardoimisen myötä laskemaan huomattavasti. Standardin mukaiset tuotteet tarjoavat myös valmistajariippumattomuuden, jolloin eri valmistajien tuotteita voidaan käyttää samassa verkossa.

#### 3.1.1 IEEE P802.11 (draft) standardin fyysiset spesifikaatiot

Nämä fyysiset spesifikaatiot langattomille ISM-alueella toimiville lähiverkoille on otettu vielä luonnosasteella olevasta IEEE:n 802.11-standardista [6].

##### 3.1.1.1 Kanavien lukumäärä

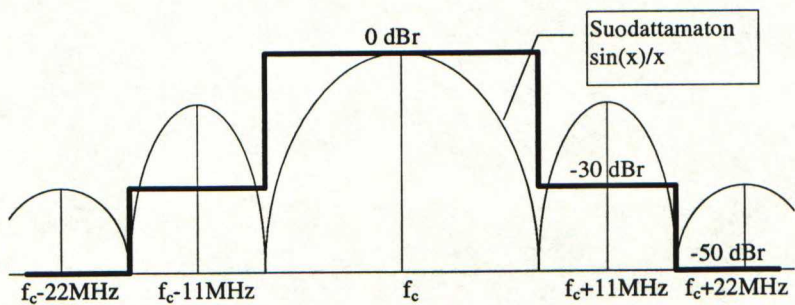
Standardi määrittelee seitsemän kanavaa taajuuskaistalle 2,4 - 2,4835 GHz. Nämä kanavat on jaoteltu neljään kanavaryhmään, joissa samaan kanavaryhmään kuuluvia kanavia voidaan käyttää yhtäaikaaisesti ilman interferenssiongelmia. Eri kanavaryhmien yhtäaikainen käyttäminen vaatii solukkonverkon taajuussuunnittelua.

Taulukko 2. Taajuuskanava suunnitelma.

Kanava tunnus	Kanava ryhmä	FCC:n kanavat, $f_c$ [GHz]	ETSI:n kanavat, $f_c$ [GHz]	Japanin kanavat, $f_c$ [GHz]
1	1a	2,412	ei käytössä	ei käytössä
2	1b	2,442	2,442	ei käytössä
3	2a	2,422	2,422	ei käytössä
4	2b	2,452	2,452	ei käytössä
5	3a	2,432	2,432	ei käytössä
6	3b	2,462	2,462	ei käytössä
7	4	ei käytössä	ei käytössä	2,483

3.1.1.2 Lähetytseho ja spektrimuoto

IEEE 802.11-standardi määrittelee maksimilähetytsehoksi (EIRP) Euroopassa 100 mW. Minimilähetytseho on 10 mW. Spektrimuoto on määritelty seuraavan kuvan 7 mukaisesti, kun mittaus tehdään antenniportista 100 kHz resoluutiokaistanleveydellä.



Kuva 7. Standardin määrittelemä spektrimaskikuvio.

3.1.1.3 Lähettimen keskitaajuuden taajuusstabiilius

Lähettimen keskitaajuuden  $f_c$  taajuustoleranssiksi on standardissa määritelty  $\pm 25$  ppm koko lämpötila-alueella.



#### 3.1.1.4 Vastaanottimen minimiherkkyystaso

Vastaanottimen antenniliittimestä mitatulla -80 dBm tehotasolla bittivirhesuhteen (BER) tulee olla pienempi kuin  $10^{-5}$ . Bittivirhesuhde on spesifioitu 2 Mbit/s QPSK-moduloidulle signaalille, jossa käytetään 11-chippistä Barker-hajotuskoodia.

#### 3.1.1.5 Vastaanottimen viereisen kanavan häiriönsieto

Viereisen kanavan häiriön ollessa 35 desibeliä suurempi kuin varsinainen hyötysignaali, on bittivirhesuhteen oltava parempi kuin  $10^{-5}$  käytettäessä 2 Mbit/s QPSK-moduloitua signaalia ja 11-chippistä Barker-hajotuskoodia.

Mittaus tehdään seuraavasti: Vastaanottimen sisääntulosignaalin (2 Mbit/s QPSK ja 11-chippinen hajotuskoodi) tehotaso on 6 dB suurempi kuin minimiherkkyystaso ( $-80\text{dBm} + 6\text{dB} = -74\text{dBm}$ ). Viereisellä kanavalla (sama kanavaryhmä, katso kappale 3.1.1.1 *Kanavien lukumäärä*) olevan samalla tavalla moduloidun signaalin tehotaso, joka täyttää lähettimen spektrimuotovaatimukset (katso kappale 3.1.1.2 *Lähetysteho ja spektrimuoto*) on 41 dB minimiherkkyystason yläpuolella ( $-80\text{dBm} + 41\text{dB} = -39\text{dBm}$ ). Viereisen kanavan signaalin tulee olla peräisin eri signaalilähteestä, pelkkä taajuuden ja vaiheen suhteen siirretty signaali ei kelpaa. Näissä olosuhteissa bittivirhesuhteen tulee olla pienempi kuin  $10^{-5}$ . Signaalin on siis kestävä 35 dB suurempi häiriösignaalin tehotaso 30 MHz:n päässä.

### 3.2 ETSI ETS 300 328-standardi (Wideband Data Transmission Systems)

Tämä standardi noudattelee sisällöltään IEEE:n 802.11-standardiluonnosta, paitsi että infrapunälähiverkkoja ei ole käsitelty lainkaan. Standardissa on myös määritelty standardien vaatimusten mittaukset käytännössä. Näitä määrittelyjä on käytetty myöhemmin tässä työssä.

### 3.3 ETSI HIPERLAN langaton lähiverkkostandardi

ETSI:n kehittämä HIPERLAN (High Performance Radio LAN) on tulevaisuuden langaton lähiverkkostandardi. Se tarjoaa 23,5 Mbit/s siirtonopeuden radiotiellä 5,2 GHz:n taajuudella. Toinen HIPERLAN:lle varattu taajuusalue on 17,2 GHz, mutta tämän alueen standardointi on vielä pahasti kesken. HIPERLAN:ia kehitetään ETSl:n



RES10:ssä. Tässä kappaleessa esitetyt tiedot ovat peräisin ETSI:n HIPERLAN-standardiluonnoksesta [7] ja Microwaves and RF 95 -konferenssista [8,9].

HIPERLAN:lle Euroopassa varatut kaksi taajuusaluetta on esitetty seuraavassa taulukossa 3.

*Taulukko 3. HIPERLAN:lle varatut taajuusalueet.*

Taajuusalue	Lähetysteho
5,15 - 5,25/5,30 GHz	+30 dBm (EIRP)
17,1 - 17,3 GHz	+20 dBm (EIRP)

HIPERLAN:lle Euroopassa varattu alempi taajuusalue on 5,2 GHz:n keskitajuudella ja ylempi alue 17,2 GHz:n keskitajuudella. Alemmalla 5,2 GHz:n taajuusalueella HIPERLAN:lla on Euroopassa käytössä Ranskaa lukuun ottamatta 150 MHz:n kaistanleveys, Ranskassa on käytössä vain 100 MHz:n kaistanleveys. Tämän alemman taajuusalueen standardointi on jo hyvässä vauhdissa ja ensimmäisten HIPERLAN-tuotteiden odotetaan ilmestyvän markkinoille parin vuoden kuluessa.

Ylemmän 17,2 GHz:n taajuusalueen standardointityö ei ole päässyt vielä edes kunnolla alkuun. ETSI:n alkuperäisten suunnitelmien mukaan tämän taajuusalueen tuotteiden oli tarkoitus olla täysin identtisiä 5,2 GHz:n tuotteiden kanssa. Suunnitelmien muutos palautti kuitenkin 17,2 GHz:n HIPERLAN-korttien standardoinnin takaisin suunnittelupöydälle, koska esille on noussut tarve saada tämän alueen lähiverkkoprotokolla tukemaan paremmin ATM (Asynchronous Transfer Mode) -tyyppistä tiedonsiirtoa. ATM-tekniikka perustuu pienikokoisten vakiomittaisten datapakettien siirtoon yhteydellisessä tiedonsiirrossa, kun taas lähiverkkoprotokollat lähettävät muuttuvapituisia datapaketteja yhteydettömästi. HIPERLAN:sta puhuttaessa tarkoitetaan tästä eteenpäin aina alempaa 5,2 GHz:n taajuusaluetta.

Merkittävää on, että 5,2 GHz:n taajuusalue on vapaana myös muualla maailmassa ja on ehkä tulossa käyttöön myös USA:ssa. Tällöin HIPERLAN tarjoaisi yli 10 Mbit/s siirtonopeuden taajuuskaistalla, joka on käytettävissä maailmanlaajuisesti. Tämä avaa standardille todella suuria tulevaisuuden näkymiä, sillä tuotteen massavalmistuksen



avulla laitevalmistajat saivat HIPERLAN-lähiverkkokortin hinnan todella edulliseksi. Tällöin sen hinta voisi olla jopa lähellä nykyisten langallisten Ethernet-lähiverkkokorttien hintaa.

Suuren siirtonopeuden kustannuksella maksimisiirtoetäisyys pienenee olemassa oleviin ISM-alueella toimiviin järjestelmiin verrattuna. On arvoitu, että sisätiloissa maksimi kantama olisi noin 20 metriä. Ulkotiloissa lähiverkkokortin avulla päästäisiin noin 80 metrin kantamaan.

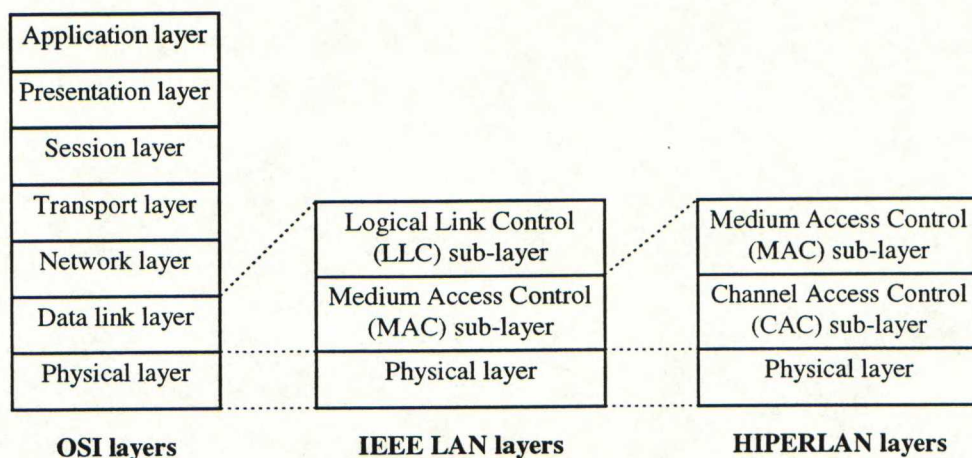
Aikataulu HIPERLAN standardille ja standardin mukaisille tuotteille tällä hetkellä on:

- ETSI:n ETR 069 (Services and facilities) valmistui helmikuussa 1993
- Yleisiä ominaisuuksia määrittelevä ETSI:n raportti ETR 133 (System definition) valmistui heinäkuussa 1994
- Yleisiä ominaisuuksia määrittelevä ETSI:n standardi (System definition) valmistui tammikuussa 1995
- Teknisiä ominaisuuksia 5,2 GHz:n taajuusalueelle määrittelevä luonnos ETSI (draft) prETS 300 652 (Functional specification) julkaistiin heinäkuussa 1995
- Julkinen kyselykierros laitevalmistajille ja operaattoreille (Public Enquiry) päättyi marraskuussa 1995
- Tyyppihyväksyntä spesifikaation luonnos julkaistiin syksyllä 1995 (Type conformance Specification Draft)
- Ensimmäiset 5,2 GHz:n taajuusalueella toimivat tuotteet tulevat markkinoille vuonna 1996/1997

### ***3.3.1 HIPERLAN:in fyysinen kerros ja siirtoyhteyskerros***

Tässä kappaleessa esitetyt fyysisen kerroksen ja siirtoyhteyskerroksen yksityiskohdalliset tiedot voivat käynnissä olevan kyselykierroksen aikana vielä muuttua, mutta kovinkaan suuria muutoksia ei ole odotettavissa. Esitettyihin tietoihin on kuitenkin syytä suhtautua pienellä varauksella.

HIPERLAN määrittelee kahden alimman OSI (Open System Interconnection) -mallin kerroksen, jotka ovat fyysinen kerros ja siirtoyhteyserros (Physical layer & Data link layer). Kuvassa 8 on esitetty ISO:n OSI-referenssimallin kerrokset, IEEE:n määrittelemät kerrokset langattomille lähiverkoille ja ETSI:n määrittelemät kerrokset HIPERLAN:lle. Kuvassa 8 on myös esitetty näiden kerrosten suhde toisiinsa.



Kuva 8. OSI-, IEEE- ja HIPERLAN-kerrokset.

ISO:n OSI-malli määrittelee kehyksen uusille standardeille ja standardointityölle ja jakaa tietoliikenteen kuvan mukaisesti OSI-mallin kerroksiin. Kahta alinta kerrosta käsiteltäessä fyysinen kerros (Physical Layer) on vastuussa yksittäisten bittien välityksestä ja signaloinnista. Siirtoyhteyserros (Data Link Layer) on vastuussa virheiden käsittelystä, datavuon ohjauksesta yksittäisellä datayhteydellä ja kanavan varausmenetelmästä (MAC, Medium Access Control).

Lähiverkoissa suurimman osan standardointityöstä on tehnyt IEEE 802-komitea. IEEE:n lähiverkkostandardeissa siirtoyhteys on jaettu MAC-kerrokseen ja LLC (Logical Link Control) -kerrokseen, joka vastaa virheiden ja datavuon ohjauksesta kahden pisteen välillä. ETSI on jakanut IEEE:n MAC-kerroksen HIPERLAN:ssa edelleen CAC (Channel Access Control) -kerrokseen.

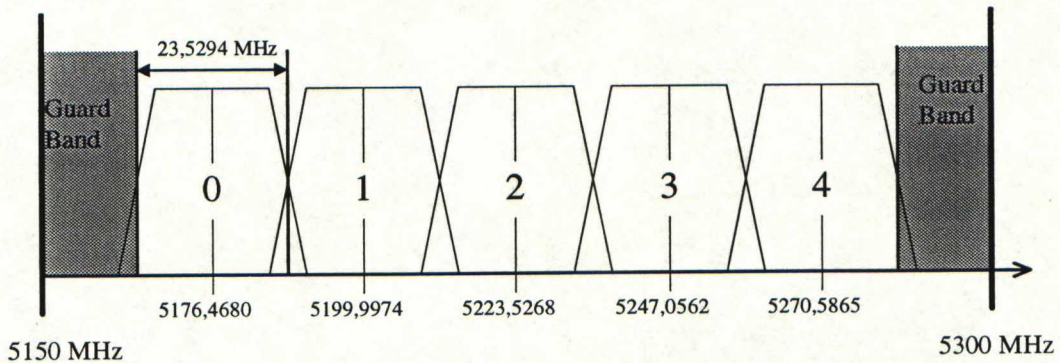
HIPERLAN:in fyysinen kerros on radiokanava käsittäen radion ja modeemin. Fyysinen kerros lähettää ja vastaanottaa bittivirtaa määritellyllä siirtonopeudella ja vastaa RF-kantoaallon moduloinnista ja demoduloinnista pyydettyä ajankohtana. Se



myös vastaa datan koodaamisesta ja dekoodaamisesta määriteltäviä virheenkorjausmenetelmää (FEC) noudattaen, synkronointisekvenssin lisäämisestä ja poistamisesta ja bitti- ja pakettisynkronoinnin saavuttamisesta ja säilyttämisestä. Kanavanvarausmenetelmää varten fyysinen kerros on vastuussa ajantasalla olevasta signaalin tehotasoarviosta ja kanavan tilasta (vapaa tai varattu).

HIPERLAN:in siirtoyhteyshierarkia vastaa virheiden käsittelystä ja vuon ohjauksesta kahden pisteen välillä.

HIPERLAN:ssa on kolme lähetin- ja kolme vastaanotinluokkaa. Luokan A lähettimellä on yksi ulostulotehotaso, luokan B ja C lähettimillä on säädettävä ulostuloteho. Toimintataajuus järjestelmällä on 5,2 GHz:n ympäristössä, HIPERLAN:lle varatun taajuuskaistan kanavajako on esitetty seuraavassa kuvassa 9.



Kuva 9. HIPERLAN:in kanavasuunnitelma 5,2 GHz:n taajuusalueella.

HIPERLAN:lle varattu taajuuskaista on jaettu viiteen kanavaan. Näiden lisäksi molemmilla reunoilla on 15 MHz turvakaistat. Näin yhden kanavan käytössä oleva taajuuskaista on 23,5294 MHz.

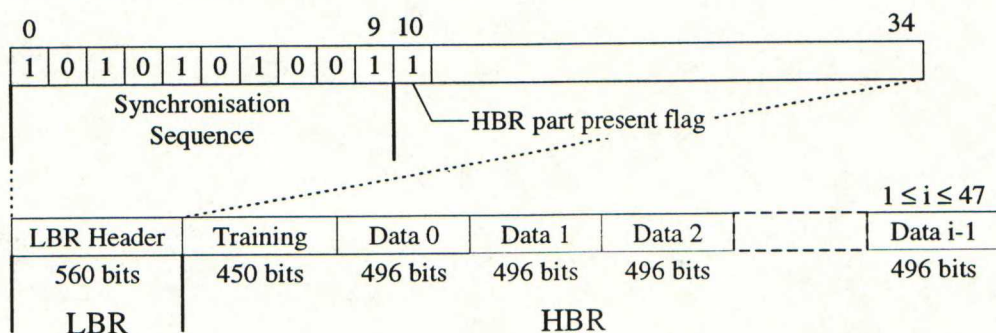
HIPERLAN:ssa modulaatiomenetelmänä on 0,3GMSK. Tämä mahdollistaa epälineaaristen tehovahvistimien käytön, joten tehonkulutus kannettavan tietokoneen akusta voidaan minimoida.

Siirtonopeus radiotiellä (HBR, High Bit Rate) on 23,5294 Mbit/s. HIPERLAN:ssa on myös datapakettien synkronoisissa ja kuittauspaketeissa (ACK,

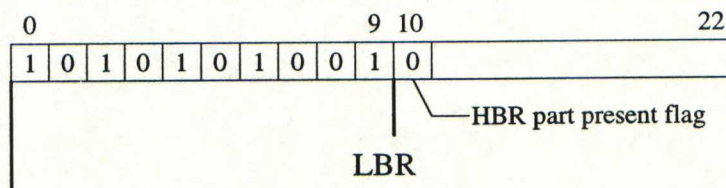
Acknowledgement) käytetty hitaampi siirtonopeus (LBR, Low Bit Rate), joka on radiotiellä 1,4706 Mbit/s.

HIPERLAN:in data- ja kuittauspakettien kehysrakenne on esitetty kuvassa 10.

HIPERLAN Data Packet



HIPERLAN ACK Packet



Kuva 10. HIPERLAN:in data- ja kuittauspakettien rakenne.

Siirtotiellä esiintyy kolme eri pakettityyppiä, jotka ovat:

- Yhteydetön (unicast) datapaketti sisältää hitaammalla siirtonopeudella lähetetyn LBR-otsikon, suuremmalla siirtonopeudella lähetetyn HBR-otsikon ja  $i$  kappaletta suuremmalla siirtonopeudella lähetettyjä HBR-datapaketteja. Yhteydettömällä yhteydellä ei käytetä kuittausta (ACK).
- Yhteydellinen (multicast) datapaketti sisältäen LBR-otsikon, HBR-otsikon ja  $i$  kappaletta HBR-datapaketteja. Tähän lähettäjä odottaa kuittausta (ACK) vastaanottajalta oikein vastaanotetun paketin jälkeen.
- Kuittauspaketti (ACK), joka lähetetään hitaalla siirtonopeudella (LBR).

Kanavanvarausmenetelmänä HIPERLAN käyttää mekanismia nimeltään EY-NPMA, joka on esitelty jo aikaisemmassa kappaleessa (kappale 2.2.4).



### 3.4 AT&T:n WaveLAN langaton lähiverkkokortti

AT&T:n langaton lähiverkkokortti WaveLAN perustuu IEEE 802.11-standardiin. Tuote ei ole vielä standardoitu, vaan täysin valmistajakohtainen eli eri valmistajien tuotteet eivät toimi yhdessä.

#### 3.4.1 WaveLAN-kortin spesifikaatiot

Suomessa WaveLAN toimii 2,460 GHz:n ISM-taajuusalueella (tarkemmin taajuuskaistalla 2,4000-2,4835 GHz), jossa on käytössä 83 MHz:n kaistanleveys. WaveLAN-korttia saa tällä hetkellä kahdella eri taajuusalueella (kanavaryhmä 3, katso kappale 3.1.1 *Kanavien lukumäärä*), tyypin A kortin keskitaajuus on 2,425 GHz ja tyypin B vastaava taajuus on 2,460 GHz, kanavaväli on siis 35 MHz. Suomessa on käytössä ainoastaan tyypin B kortteja, mutta esimerkiksi Tanska on hyväksynyt molempien tyyppien käytön.

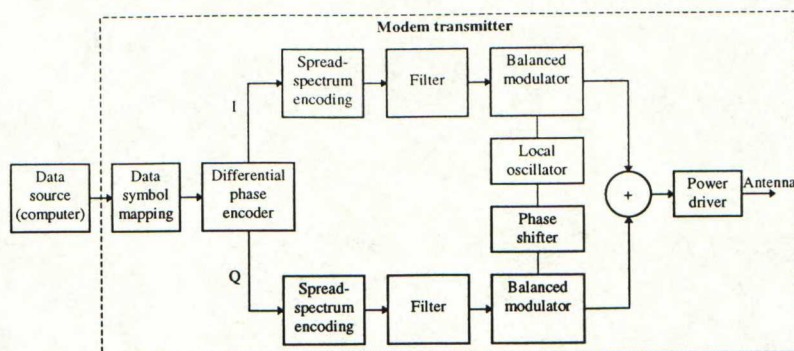
Kanavanvarausprotokollana käytössä on CSMA/CA. Standardin mukaan kortti käyttää suoraajottavaa (DS) hajaspektritekniikkaa ja hajotuskoodina käytetään 11-chippistä Barker-hajotuskoodia (katso kappale 2.3.1). Modulaatiomenetelmä on differentiaalinen quadratuuri PSK eli DQPSK. Tällä modulaatiomenetelmällä kaksi bittiä koodataan yhdeksi vaihemuutokseksi ja varsinaisella radiotien taajuuskaistalla saadaan kulkemaan kaksinkertainen signaalikaistanleveys verrattuna binääriseen modulaatioon. Modulaatiomenetelmä vaatii lineaarisen tehovahvistimen (vähintään A/B-luokka), joten tehonkulutus kannettavissa tietokoneissa ei ole pienin mahdollinen.

#### 3.4.2 WaveLAN-kortin rakenne

Verkkokorttia saa sekä ISA-väyläisenä (täyspitkä kortti), MCA (Micro Channel Architecture) -väyläisenä että PCMCIA-liitäntäisenä (Type II), jolloin kortti sopii kaikkiin nykyisiin kannettaviin tietokoneisiin. Paketti sisältää verkkokortin, ulkoisen ympärisäteilevän antennin ja laiteajurit.

Kortin modeemin ja lähettimen lohkokaavio on esitetty seuraavassa kuvassa 11.





Kuva 11. Lohkokaavio WaveLAN-kortin modeemista ja lähettimestä.

Kuvassa käyttäjältä tuleva data jaetaan kahden bitin symboleihin modeemissa ja differentiaalinen vaihemodulaattori moduloi nämä symbolit neljäksi eri vaihetilaksi I- ja Q-haaraan. Nämä haarat moduloidaan valesatunnaisella Barker-koodilla, suodatetaan ja moduloidaan radiotielle balansoidussa modulaattorissa. Tämän jälkeen signaalit summataan, vahvistetaan tehovahvistimessa ja suodatetaan kanvasuodattimessa ja lähetetään radiotielle.

Kortin protokolla tarjoaa 2 Mbit/s siirtonopeuden. Kuormitetussa verkossa käytössä oleva kapasiteetti on todellisuudessa huomattavasti tätä alhaisempi johtuen lukuisista törmäyksistä. Seuraavassa kuvassa on esitetty langallisen Ethernetin (10 Mbit/s) ja langattoman WaveLAN:in siirtonopeuksien vertailua, kun verkossa on neljä aktiivista käyttäjää. Tästä nähdään WaveLAN:in todellisen kapasiteetin maksimissaankin olevan noin 1 Mbit/s.



Kuva 12. 10 Mbit/s Ethernetin ja 2 Mbit/s WaveLAN:in suorituskyvyn vertailua käytettäessä erilaisia pakettikokoja, kun verkossa on neljä aktiivista käyttäjää [10].

Suurin saavutettava kantama WaveLAN-kortilla ulkotiloissa on noin 180 metriä, sisätiloissa muutama kymmenen metriä.



## 4 ERÄS RATKAISU LANGATTOMAN LÄHIVERKKOPALVELUN TARJOAMISEKSI

---

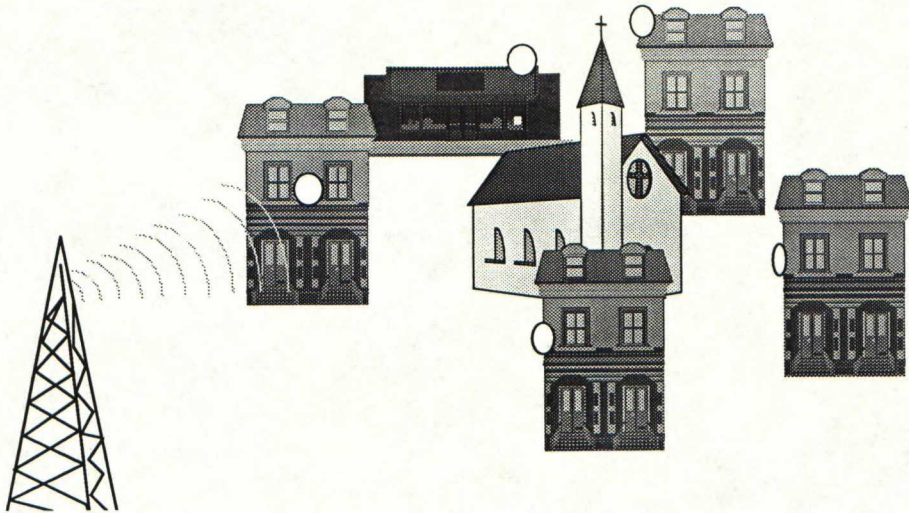
Langattomat lähiverkkokorttiprotokollat 2,4 GHz:n ISM-kaistalla tarjoavat 2 Mbit/s nopeuden. Ongelmana tällä kaistalla on rajoitettu lähetysteho, joka on määritelty olevan maksimissaan  $EIRP = 100 \text{ mW}$  (Euroopassa). Suurin sallittu lähetysteho rajoittaa suurimman mahdollisen solunsäteen näköyhteydellä pariin sataan metriin.

Tarjottaessa langatonta lähiverkkoliityntää kuluttajille tarvitaan huomattavasti suurempaa solusädettä. Tämä voidaan saavuttaa siirtämällä langattoman lähiverkkokortin ulostulo ylöspäin vapaalle taajuusalueelle, jonka käyttöön haetaan käyttö lupa telehallintoviranomaiselta. Tällainen taajuusalue voisi olla esimerkiksi ylemmän HIPERLAN-kaistan ja PTP-radiolinkkikaistan välissä oleva alue 17,67 GHz:n ympäristössä. Tämä taajuus voisi olla mikä tahansa muukin taajuus 10 - 40 GHz:n välillä. Konseptin käytännön toteutuksen testaamiseksi valittiin kuitenkin tämä 17,67 GHz:n taajuus.

Valitulla suuremmalla taajuudella EIRP-tehoa ei enää ole rajoitettu yhtä tiukasti kuin esimerkiksi ISM-kaistan taajuuksilla. Yli 10 GHz taajuuksilla voimakkaastikin suuntaava antenni on riittävän pienikokoinen, joten EIRP-tehoa voidaan helposti lisätä. Taajuusmuuntimeen on myös mahdollista lisätä vahvistusta, esimerkiksi LNA (Low Noise Amplifier) -vahvistin vastaanottosuuntaan ja tehovahvistin lähetyssuuntaan.

Seuraava kuva 13 esittää periaatteellisen kuvan verkon toteutuksesta. Tukiasemassa käytetään sektoriantennia. Tilaajalla on voimakkaasti suuntaava antenni, esimerkiksi paraboloidiantenni ja taajuusmuunnin.





*Kuva 13. Langattoman lähiverkkoliitännän tarjoaminen kuluttajille.*

Tulevaisuudessa on myös mahdollisuus hyödyntää uusia HIPERLAN-standardin kortteja. Koska kyseessä on standardoitu tuote, HIPERLAN-standardin mukaiset lähiverkkokortit tarjoavan huomattavan suuren siirtonopeuden edulliseen hintaan. HIPERLAN-protokolla tarjoaa 5,2 GHz:n ympäristössä 10-20 Mbit/s siirtonopeuden ja 17,2 GHz:n ympäristössä kyvyn välittää ATM-muotoista dataa. Näin tulevaisuudessa olisi mahdollista tarjota esimerkiksi kaupallista langatonta ATM-liittymää pienyrityksille ja kotitalouksille.

#### 4.1 Ratkaisun kuvaus

Signaalikaistan siirto 2,46 GHz:n taajuudelta ylemmälle 17,67 GHz:n taajuudelle on toteutettu resiprookkisella sekoittimella, taajuusmuuntimella. Sama sekoitin hoitaa sekä ylös- että alassekoituksen kaksisuuntaisesti, sekä lähetys että vastaanotto tapahtuu samassa kanavassa (TDD). Itse lähiverkkokortti ei näe taajuusmuunninta lainkaan, sen näkökulmasta se on 'musta laatikko', joka on osa radiokanavaa. Ratkaisu on erittäin yksinkertainen rakenteeltaan, minkä seurauksena muuntimen hinta saadaan edullisemmaksi.

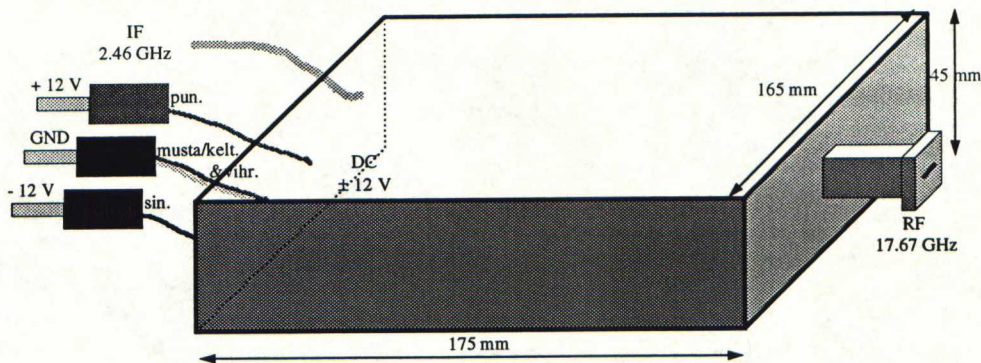
Ratkaisun vaihtoehtona olisi ollut muuttaa varsinaisen lähiverkkokortin ulostulotaajuutta, mikä olisi vaatinut tiivistä yhteistyötä kortin valmistajan kanssa. Lähiverkkokorttien integrointi on jo kuitenkin edennyt niin pitkälle, että niiden asiakaskohtainen suunnittelu ei enää ole mahdollista kohtuullisilla kustannuksilla.



Tulevaisuudessa langattomien lähiverkkostandardien valmistuessa tuotteet muuttuvat yhä ankarammin kilpailuksi massatuotteeksi, ja tässä kilpailussa menestyy vain suuren integrointiasteen omaavalla tuotteella. Tällöin koko tuote on optimissaan kahdella tai kolmella IC-piirillä.

#### 4.1.1 Taajuusmuuntimen ulkomuoto ja liitännät

Tehdyn ratkaisun mukaisen taajuusmuuntimen rakensi Insinööritoimisto Ylinen Oy Telecom Finland Oy:n Telekehityskeskukseen toimeksiannosta. Taajuusmuuntimia rakennettiin kaksi kappaletta (*sekoitin 1* ja *sekoitin 2*). Muuntimen ulkomuoto ja sen fyysiset mitat on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Toteutettu taajuusmuunnin, sen kytkennät ja fyysiset mitat.

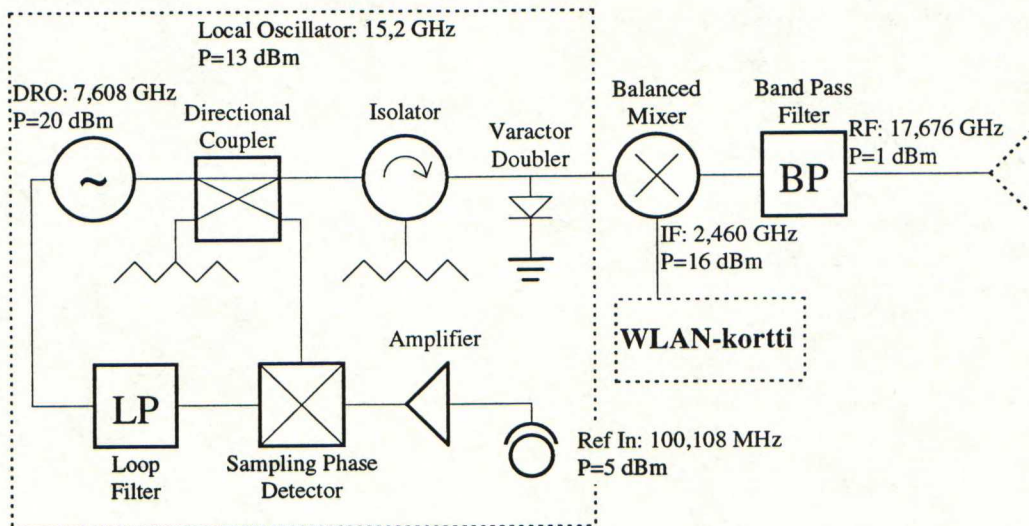
Liitännät taajuusmuuntimen ulkopuolella ovat koaksiaalinen BNC-liitäntä WLAN-kortille 2,46 GHz:n taajuudella (IF), taajuusmuuntimen vaatima käyttöjännitelitettä  $\pm 12$  V tasajännitteelle ja aaltoputkiulostulo antennille 17,67 GHz:n taajuudella (RF). Lisäksi muuntimeen on laboratoriomittauksia varten lisätty vielä ulkoinen referenssisignaalin syöttömahdollisuus paikallisoskillaattorille (REF). Tämä tekee mahdolliseksi paikallisoskillaattorin ulostulotaajuuden säätämisen tarkan signaaligeneraattorin avulla parin megahertsin verran.

#### 4.1.2 Taajuusmuuntimen lohkokaavio ja toiminta

Taajuusmuuntimen paikallisoskillaattori on toteutettu 100,108 MHz:n referenssi-kideoskillaattorista ja tähän kiteeseen vaihelukitusta 7,6 GHz:n dielektrisellä resonaattorilla stabiloidusta oskillaattorista (DRO, Dielectric Resonator Oscillator).



Paikallisoskillaattorin tuottama teho syötetään kiertoelimen (Isolator) kautta taajuuden kahdentajaan (Varactor Doubler) ja edelleen mikseridiorakenteiseen balansoituun sekoittimeen (Balanced Mixer). Viimeinen elementti on aaltoputkirakenteinen 17,67 GHz:n kaistanpäästösuodatin (Band Pass Filter). Muuntimen lohkokaavio on esitetty seuraavassa kuvassa 15.



Kuva 15. Taajuusmuuntimen lohkokaavio.

Taajuusmuuntimessa referenssikideoskillaattorin taajuus on 100,108 MHz. Signaalin tehotaso on noin 5 dBm. Tätä tehotasoa vahvistetaan ensimmäisessä vahvistimessa ennen referenssisignaalin syöttämistä vaiheilmaisimeen (Phase Detector). Vaiheilmaisimessa referenssisignaalista tuotetaan epälineaarisen diodin avulla kampaspektri, jonka sopivaa spektriviivaa käytetään referenssisignaalina DRO:lle. Dielektrisen resonaattorioskillaattorin ulostulosta otetaan näytteitä suuntakytkimellä (Directional Coupler) ja syötetään toisena sisäänmenosignaalina edellä mainittuun vaiheilmaisimeen. DRO:n ulostulosignaalin vaihe-ero referenssikiteen kampaspektrin 76:nneen piikin vaiheeseen tuottaa vaiheilmaisimessa ja sitä seuraavassa integraattorissa (Loop Filter) vaihe-eroon verrannollisen tasajännitteen. Tämä ohjaussignaali syötetään DRO:n taajuutta säätävälle varaktorille. Ohjaussignaali säätää dielektrisen resonaattorioskillaattorin taajuutta, joten DRO:n tuottama 7,6 GHz:n ulostulosignaali on vaihelukittu erittäin tarkkaan referenssikiteen tuottamaan 100,108 MHz:n signaaliin.



Signaalilähteen taajuus on referenssikiteen monikerta. Taajuus voidaan laskea seuraavasti. DRO:n taajuus lukkiutuu vaihelukitusilmukassa 76 kertaiseen referenssikiteen taajuuteen. Dielektrisen resonaattorioskillaattorin taajuus  $f_{DRO}$  siis on

$$f_{DRO} = 76 \cdot 100,108 \text{ MHz} = 7608,208 \text{ MHz} \quad (4)$$

Tämä signaali kulkee kiertoelimen kautta varaktoridiodiin, joka toimii taajuuden kahdentajana. Taajuuden kahdentajan jälkeen paikallisoskillaattorin ulostulotaajuudeksi  $f_{LO}$  saadaan

$$f_{LO} = 2 \cdot f_{DRO} = 15,2164 \text{ GHz} \quad (5)$$

Paikallisoskillaattoritehoa ei pääse kunnolla mittaamaan, mutta sitä voidaan arvioida dielektrisen resonaattorioskillaattorin antaman tehon perusteella. Paikallisoskillaattoriteho vaimenee DRO:n antamasta +20 dBm:stä muutaman desibelin taajuuden kahdentajassa (ja isolaattorissa) ollen noin +13 dBm.

Paikallisoskillaattorin jälkeen rakenteessa seuraavana elementtinä on balansoitu sekoitin. Sekoitin toimii ratkaisussa resiprookkisesti eli se toimii sekä ylössekoittimena että alassekoittimena. Ylössekoituksessa sekoitetaan IF-signaali 2,460 GHz tehotasolla +16 dBm ja +13 dBm:n paikallisoskillaattorisignaali 15,2164 GHz taajuudella ylös RF-taajuudelle 17,6764 GHz. Alassekoituksessa vastaavasti RF-signaali sekoitetaan takaisin IF-taajuudelle, nyt RF-signaalin tehotaso on minimissään luokkaa -60 dBm ja LO-signaalin tehotaso on sama +13 dBm.

Sekoittimessa on käytetty sekoitindiodeja, jotka on ideaalisesti tarkoitettu vastaanotinkäyttöön eli alassekoitukseen. Tätä sekoitinta ajetaan vastaanotinkäytössä tarkoitettua suuremmalla paikallisoskillaattoritehotasolla. Tästä aiheutuu useita ongelmia, muunmuassa vastaanottimen kohinaluvun heikkenemistä. Toisaalta ylössekoituksessa sekoitindiodeja kuormitetaan hyvin suurella IF-tehotasolla. Lisäksi sekoitindiodit toimivat vielä äärimmäisen epälineaarilla alueella paikallisoskillaattoritehotason ollessa noin 5 desibeliä pienempi kuin IF-signaalin tehotason.

Viimeisenä osana taajuusmuuntimessa on aaltoputkirakenteinen kaistanpäästösuodatin 17,67 GHz:lle. Tällä kaistanpäästösuodattimella suodatetaan ongelmalliset

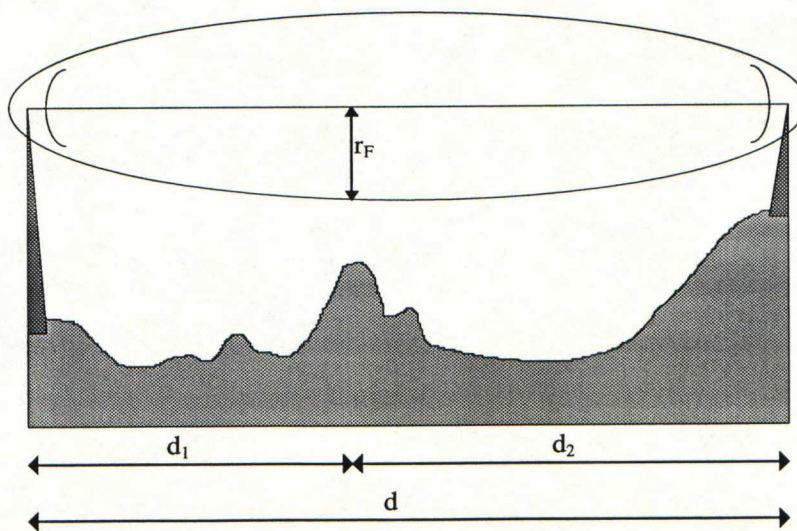
referenssikideoskillaattorin harmonisista monikerroista aiheutuvat häiriöpiikit 100 MHz:n päässä varsinaisesta signaalista. Se vaimentaa myös paikallisoskillaattorin 15,2 GHz:n balansoidusta sekoittimesta vuotavaa signaalia.

## 4.2 Radioyhteyden suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä

### 4.2.1 Radioaaltojen vapaantilan eteneminen

Seuraavassa käsitellään mekanismeja, jotka vaikuttavat radioaaltojen etenemiseen yli 10 GHz:n taajuudella lyhyillä vain parin kilometrin linkkijänteillä. Näitä mekanismeja ovat heijastuminen, absorptio ja sateen, lumen ja jään aiheuttama vaimennus. Radioaaltojen taipumisen ja taittumisen voi lyhyillä jänteillä käytännössä unohtaa. Radioaallon kokema vaimennus voidaan laskea vapaantilan vaimennuksen kaavalla. Yli 10 GHz:n taajuisen radioaallon katsotaan kulkevan vapaassa tilassa, jos sen näköyhteydellä on vapaana Fresnelin ensimmäinen vyöhyke.

#### Fresnelin vyöhyke



Kuva 16. Fresnelin ensimmäisen vyöhykkeen määrittäminen linkkiyhteydellä.

Fresnelin  $n$ :nnen vyöhykkeen säteelle on voimassa kaava

$$r_{F,n} = \sqrt{n \cdot \frac{c}{f_c} \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{d}} \quad (6)$$



missä  $n$  on vaihe-erojaksojen  $\pi$  lukumäärä,  $d$  linkkiyhteyden pituus ja  $d_1$  ja  $d_2$  ovat dominoivan esteen etäisyydet kuvan 16 osoittamalla tavalla. Suurin osa linkkiyhteyden tehosta kulkee Fresnelin ensimmäisessä vyöhykkeessä, jossa  $n$  saa arvon yksi ( $n=1$ ).

### Vapaantilan eteneminen

Radioaallon tehotiheys pienenee sen edetessä lähetinantennista vastaanottoantenniin. Vapaalla tilalla tarkoitetaan ideaalisesti muista esineistä vapaata avaruutta, jossa mikään esine ei tunkeudu antennien välisen yhteyden välille. Käytännössä vapaantilan vaimennuksen käyttämisen ehtona noin 18 GHz:n taajuudella on, että vastaanotto- ja lähetysantennit ovat riittävät kaukana toisistaan (kaukokentässä) ja että mikään este ei tunkeudu ensimmäiselle Fresnelin vyöhykkeelle.

Vapaantilan vaimennus lasketaan kaavasta

$$L_0 = 92,6 + 20\log(d) + 20\log(f_c) \quad (7)$$

missä  $L_0$  on vapaantilan vaimennus [dB],  $d$  on etäisyys [km] ja  $f_c$  on kantoaallon taajuus [GHz].

### Heijastuminen

Radioaalto heijastuu osuessaan heijastavaan pintaan. Maaheijastuksissa heijastuskerroin on yleensä suuruusluokkaa 0,03 .. 0,1, mutta soisilla ja järvisillä alueilla heijastuskerroin voi olla lähes -1. Kaupunkiympäristössä heijastukset ovat erittäin voimakkaita esimerkiksi rakennusten seinistä, peltikatoista ja savupiipuista. Voimakas heijastus edellyttää, että heijastavan alueen korkeusvaihteluiden tulee heijastuskohdassa olla pieniä heijastuvan radioaallon aallonpituuteen nähden.

### Absorptio

Ilmakehän kaasut ja vesihöyry vaimentavat radioaaltoja. Kaasuista eniten merkitsevän happimolekyylin ( $O_2$ ) ensimmäinen absorptiopiikki on noin 60 GHz:n kohdalla (15 dB/km), vesihöyryn ( $H_2O$ ) ensimmäisen absorptiopiikin ollessa noin 23 GHz:n tuntumassa (0,2 dB/km). Alle 20 GHz:n taajuudella kaasujen absorptio ei ole merkittävää.



### **Sadevaimennus**

Sateelle voidaan johtaa ominaisvaimennus taajuuden ja sademäärän funktiona. Merkittävänä erona kaasujen vaimennukseen on kuitenkin se, että sateet esiintyvät paikallisesti ja lyhyehkön aikaa kerrallaan. Sadevaimennuksen kohdalla puhutaankin aikaprosentista, jolla tietty sademäärä ylitetään tietyllä maantieteellisellä alueella. Rankkasateen sadevaimennus voi katkaista linkkiyhteyden, jos suunnittelussa ei ole varattu tarpeeksi sadevaimennusvaraa.

Lumen aiheuttama vaimennus on yleensä pieni, mutta märkä lumi voi vaimentaa radioaaltoa jopa vesisadetta enemmän. Myös sumun aiheuttama vaimennus on pientä. Suomessa merkittävä vaimennustekijä radiolinkkiyhteydellä on antenneihin kertyvä lumi ja jää.

### **4.2.2 Eri etenemismekanismien aiheuttamat häipymisilmiöt**

Edellä mainitut etenemismekanismit aiheuttavat signaalissa häipymiä ja vääristymiä. Signaalin häipymä on ajan tai liikkuvan päätelaitteen tapauksessa paikan funktiona vaihtuva vaimennuksen muutos. Useat eri tekijät voivat vaikuttaa signaaliin yhtäaikaan. Alle 20 GHz:n taajuuksilla ja lyhyillä linkkiyhteyksillä merkittäviä häipymisilmiöitä ovat tasahäipyminen, selektiivinen häipyminen, signaalinousema ja monitie-eteneminen. Korkeammilla taajuuksilla ja pitemmillä yhteyksillä esiintyy lisäksi k-häipymistä ja kanavoitumista.

#### **Tasahäipyminen**

Tasahäipymisessä siirrettävän signaalin kaikki taajuudet vaimenevat samalla tavalla. Tasahäipymää aiheuttavat lähinnä k-häipyminen sekä sade- ja absorptiovaimennus. Myös monitie-eteneminen ja kanavoituminen voivat aiheuttaa tasahäipymistä, jos eri teitä kulkeneet signaalit ovat samanhaiheisia ja niiden kaistanleveys on pieni.

#### **Selektiivinen häipyminen**

Taajuusselektiivisessä häipymässä signaalin eri taajuudet vaimenevat eri tavalla. Näin signaali vaimenemisen lisäksi vääristyy ja syntyy symbolien välistä keskinäisvaikutusta. Selektiivistä häipymää aiheuttaa monitie-eteneminen ja kanavoituminen.



### **Signaalinousema**

Häipymän lisäksi linkkiyhteydellä voi esiintyä myös vahvistumista, jos vastaanotetut signaalit summautuvat vastaanottimessa sopivissa vaiheissa.

### **Monitie-eteneminen**

Monitie-etenemisessä vastaanotettu signaali on kulkenut kahta tai useampaa signaalitietä pitkin. Eri etenemisteiden kulkuaikaerot ovat suuruusluokkaa 0,1 .. 30 ns. Edellä mainituista etenemisilmiöistä taittuminen ja heijastuminen aiheuttavat monitie-etenemistä.

## 5 LABORATORIOMITTAUKSET

---

Mittauksissa on noudatettu mahdollisuuksien mukaan IEEE 802.11-standardin (draft) ja ETSI:n standardin ETS 300 328 mittausjärjestelyjä ja vaatimuksia. Mittaukset on suoritettu pääasiassa Tele Engineeringin Radiolinkkilaboratorion tiloissa Helsingin Lauttasaarella joulukuussa 1995.

### 5.1 WaveLAN-kortille tehtyt laboratoriomittaukset

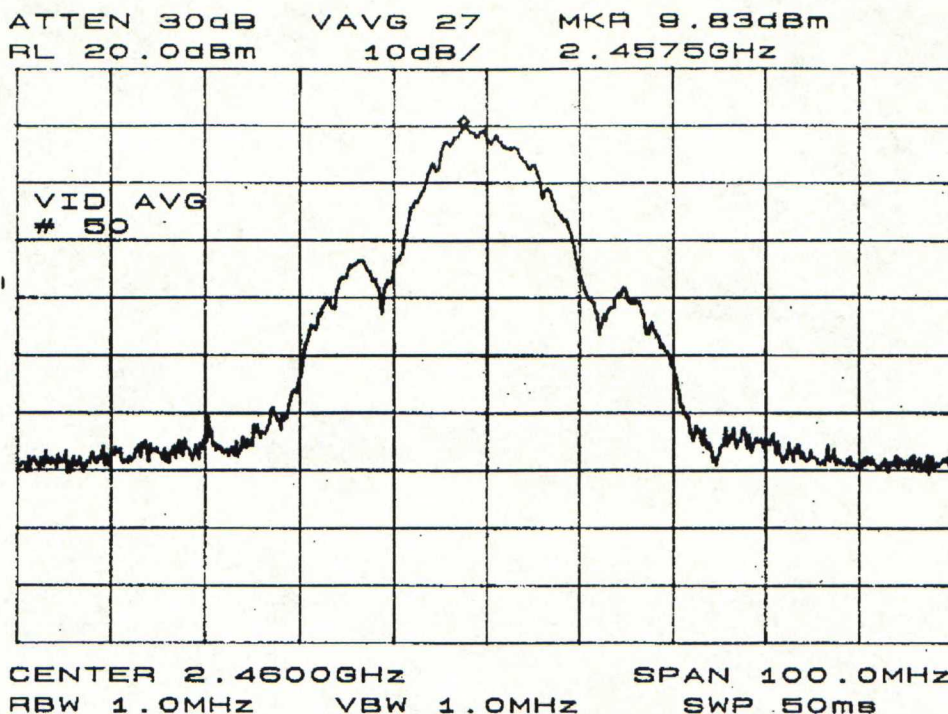
WaveLAN-lähiverkkokortille on tehty joukko mittauksia, joissa tutkittiin, täyttävätkö kyseiset yksilöt olemassa olevien standardien ja standardiluonnosten vaatimuksia. Korteista mitattiin spektrimuoto ja kaistan leveys, vastaanottimen kynnystaso ja vastaanottimen viereisen kanavan häiriönsieto.

#### 5.1.1 WaveLAN-lähiverkkokortin spektrimuoto

Mittauksessa on käytetty Hewlett Packardin spektrianalysaattoria (HP 8562A). Resoluutio- ja videokaistanleveytenä on mittauksessa käytetty 1 MHz kaistanleveyttä. Spektrianalysaattorissa käytettiin ETSI:n vaatimusten mukaan 50 pyyhkäisyn keskiarvoistusta. Tämän lisäksi jouduttiin pienen pulssisuhteen vuoksi lisäämään vielä MaxHold-asetus, koska keskiarvoistus ei vielä näin lyhytkestoilla pulsseilla antanut todellista spektrimuotoa.

Mitattua WaveLAN-kortin spektriä esittävästä kuvasta 17 saadaan signaalin kaistanleveydeksi noin 25 MHz, kun kaistanleveyden määrittämiseen käytetään ETSI:n vaatimusta spektrin -80 dBm/Hz minimitehotiheydestä signaalin taajuuskaistalla. Mitattujen lähiverkkokorttien todettiin täyttävän IEEE 802.11-standardin spektrimuotovaatimukset, jonka mukaan ensimmäisen sivunauhan on oltava 20 dB alempana kuin päänauhan, kun mittaus tehdään 1 MHz:n resoluutiokaistanleveydellä.





Kuva 17. WaveLAN-lähiverkkokortin spektrimuoto 2,46 GHz:n taajuudella.

### 5.1.2 Bittivirhesuhde (BER) ja pakettivirhesuhde (PER)

Standardin vaatimusten mukaan kynnystason ja viereisen kanavan häiriömittausta varten lähiverkkokorteista mitataan bittivirhesuhdetta vastaanotetun tehotason funktiona. Tämä ei kuitenkaan käytetyllä mittauslaitteistolla ollut mahdollista, joten tässä mittauksessa on mitattu pakettivirhesuhdetta bittivirhesuhteen asemasta.

Pakettivirheen mittauksessa on käytetty PTPDIAG-nimistä linkkiyhteyden mittausohjelmaa. Tämä ohjelma on tarkoitettu langattoman lähiverkon asennusvaiheeseen, jolloin on tarpeen tarkkailla verkkoon lisätyjen uusien linkkiyhteyksien laatua. Ohjelma lähettää ja vastaanottaa 1500 tavun eli 12000 bitin paketteja noin 10 kertaa sekunnissa ja pitää kirjaa molempien suuntien linkkiyhteyden laadusta.

Bittivirhesuhteen (BER) ja pakettivirhesuhteen (PER) välille saadaan yhteys, jos bittivirheet oletetaan satunnaisiksi ja Poisson-jakautuneiksi. Poisson-jakautunut todennäköisyys lasketaan kaavasta

$$P(X = k) = \frac{\theta^k}{k!} e^{-\theta}, \theta > 0, k = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$



jossa  $\theta$  on tapahtuman odotusarvo ja  $k$  tapahtumien lukumäärä. Tässä tapauksessa yhden paketin koko on  $n$  bittiä, jolloin  $P$  on pakettivirheen todennäköisyys. Odotusarvo  $\theta=n \cdot p$ , jossa  $p$  on bittivirhetodennäköisyys.

IEEE 802.11-standardi vaatii, että  $-80$  dBm:n tehotasolla vastaanottimen antenniportissa bittivirhesuhteen tulee olla parempi kuin  $10^{-5}$ . Lasketaan kuinka suuri on tunnettua bittivirhesuhdetta vastaava pakettivirhesuhde, jos kaikki aiheutuvat bittivirheet ovat satunnaisia ja Poisson-jakautuneita. Käyttäen edellä esitettyä kaavaa (8), jossa tapahtumien lukumäärä  $k > 0$  (yhdessä paketissa yksi tai enemmän bittivirhettä), yhden paketin koko  $n=12000$  bittiä ja yhden bittivirheen esiintymistodennäköisyys  $p=10^{-5}$ .

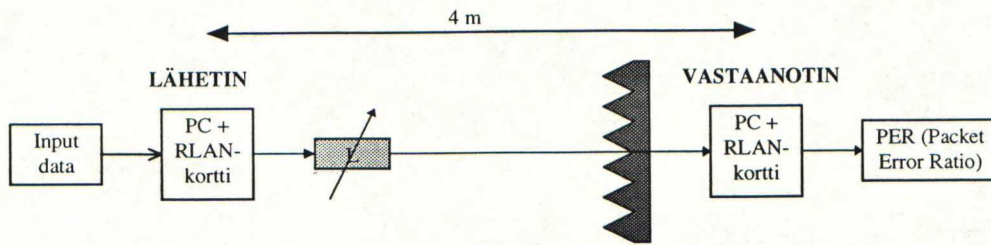
$$P(X > 0) = 1 - P(X = 0) = 1 - e^{-np} = 1 - e^{-12000 \cdot 10^{-5}} = 1,131 \cdot 10^{-1} \quad (9)$$

Näin saadaan vastaavuus, jossa bittivirhesuhdetta  $p$  vastaa pakettivirhesuhde  $P$ . Tämä vastaavuus ei ole yksiselitteinen, vaan näin saatu pakettivirhesuhde voi olla joko liian optimistinen tai pessimistinen riippuen tapahtuvien bittivirheiden lukumäärästä yhdessä datapaketissa. Koska suoran bittivirhesuhteen mittaaminen ei ole normaaleilla mittauslaitteistolla mahdollista, on ihmeteltävä, miksi IEEE 802.11-standardin vaatimukset on annettu bittivirhesuhteina, jos laitteiston toiminta kuitenkin selkeästi perustuu pakettivirhetodennäköisyyksiin.

### 5.1.3 Vastaanottimen kynnystaso

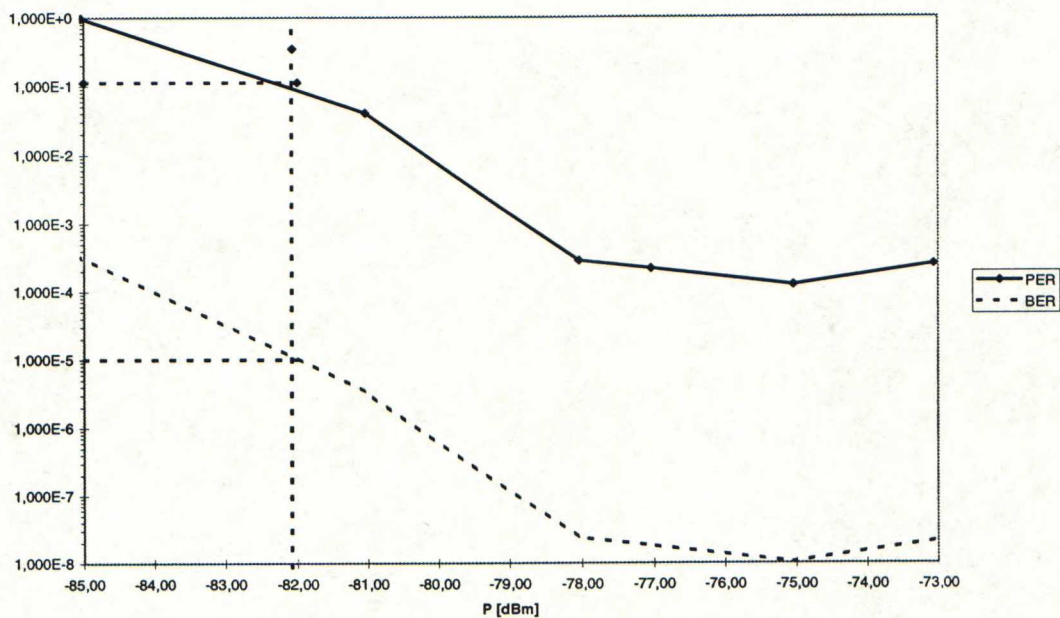
WaveLAN-kortin vastaanottimen kynnystason mittaaminen on määritelty edellä (kappaleessa 3.1.1.4 *Vastaanottimen minimiherkkyystaso*). Tässä mittauksessa mitattiin kuitenkin pakettivirhesuhdetta eri tehotasoilla bittivirhesuhteen asemasta. Lähetin ja vastaanotin kytkettiin toisiinsa koaksiaalikaapelilla ja tehotasoa lähettimen ja vastaanottimen välillä säädettiin koaksiaalisilla vaimentimilla. Signaalin suoraa kytkeytymistä 2,46 GHz:n taajuudella yritettiin lisäksi vaimentaa asettamalla absorboivaa materiaalia näköyhteydelle. Pakettivirheen mittauksessa käytettiin PTPDIAG-linkkiyhteyden mittausohjelmaa. Mittausjärjestely on esitetty kuvassa 18.





Kuva 18. Kynnystasomittauksen mittausjärjestely.

Näin saadut mittauksetulokset on puolestaan esitetty kuvassa 19.



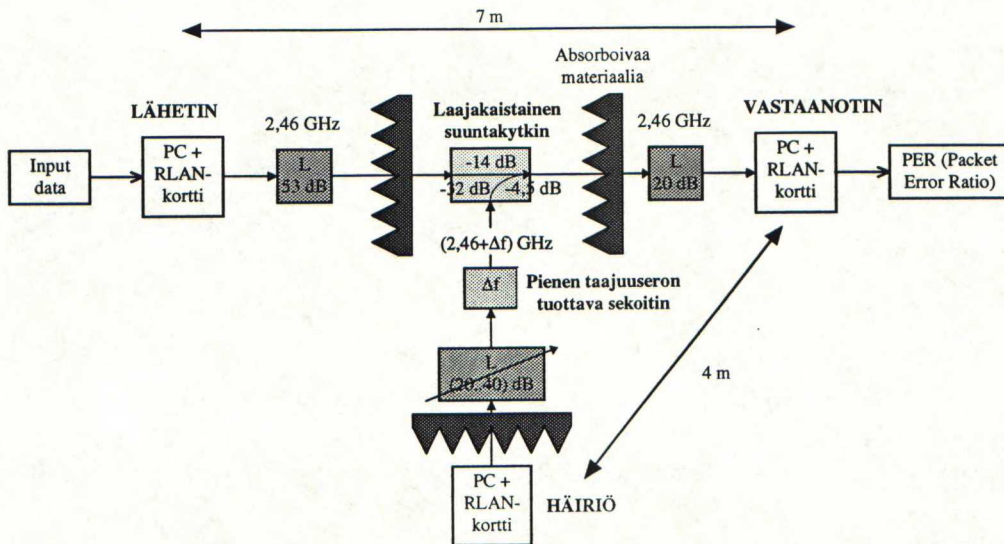
Kuva 19. WaveLAN-lähiverkkokorttien kynnystasomittauksen tuloksia.

Bittivirhesuhdetta  $BER=10^{-5}$  vastaa siis pakettivirhesuhde  $PER=1,1 \cdot 10^{-1}$ . Kun verrataan tätä raja-arvoa -80 dBm:n tehotasolla kuvasta näkyvään pakettivirhesuhteeseen  $PER = 7,0 \cdot 10^{-3}$ , voidaan todeta, että mitattu WaveLAN-kortti täyttää IEEE 802.11-standardin vaatimuksen reilusti. Kuvasta voidaan lisäksi likimäärin arvioida vastaanottimen kynnystason olevan noin -82 dBm.

#### 5.1.4 Viereisen kanavan häiriönsieto

Mittauksessa käytettiin kolmea tietokonetta (kannettava 286), joissa on AT&T:n täysipitkä WaveLAN langaton lähiverkkokortti. Kahden tietokoneen välistä yhteyttä

häirittiin häiriölähteellä, kolmannella lähiverkkokortilla. Mittausjärjestely on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Viereisen kanavan häiriönsiedon mittausjärjestely.

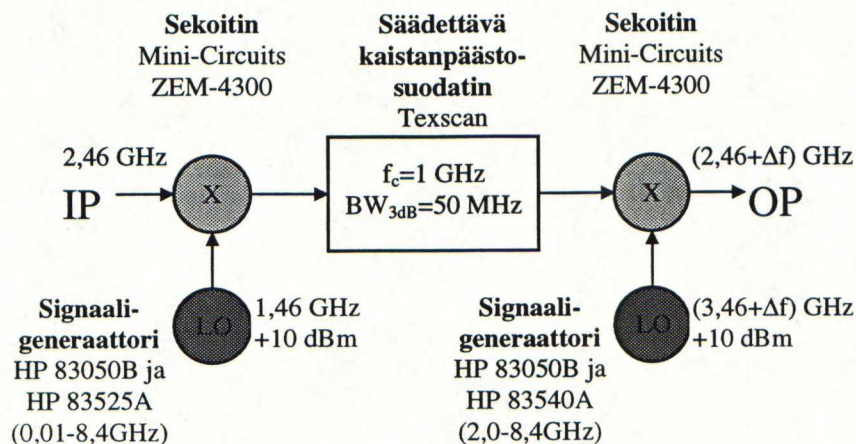
Linkkiyhteyden vaimennus on 90 dB ( $53\text{dB} + 20\text{dB} + 14\text{dB} + 3\text{dB}$ ) sisältäen järjestyksessä kaksi vaimenninta, suuntakytkimen vaimennuksen ja kaapelin vaimennuksen. Häiriöyhteydellä vaimennus on säädettävä  $63,5..83,5$  dB ( $20..40\text{dB} + 20\text{dB} + 2 \cdot 8,5\text{dB} + 4,5 + 2\text{dB}$ ), joka puolestaan sisältää kaksi vaimenninta, kahden sekoittimen sekoitusvaimennukset, suuntakytkimen vaimennuksen ja kaapelin vaimennuksen. Näillä vaimennuksilla saadaan häiriön ja varsinaisen signaalin tehotasojen eroaksi  $26,5..6,5$  dB. IEEE 802.11-standardin määrittelemää 35 dB:n viereisen kanavan häiriönsietoa ei tässä mittauksessa päästy mittaamaan.

Häiriösignaali, eli 'viereiselle' kanavalle siirretty signaali on siirretty taajuustasossa kahdella sekoittimella taajuuden  $\Delta f$  verran alkuperäisestä taajuudesta sivuun. Pienen taajuussiirtymän tuottavan sekoittimen rakenne on esitetty kuvassa 21. Sekoittimena on käytetty Mini-Circuitsin sekoitinta ZEM-4300. Säädettävänä kaistanpäästösuodattimena on käytetty Texscanin säädettävää mallia, jonka keskitaajuus säädettiin 1 GHz:n taajuudelle. Päästökaistan leveydeksi mitattiin noin 50 MHz.

Linkkimittauksissa käytetystä ohjelmistosta (WaveLAN:in mukana tuleva PTPDIAG- linkkiyhteyden mittausohjelma) johtuen jouduttiin häiriösignaalina



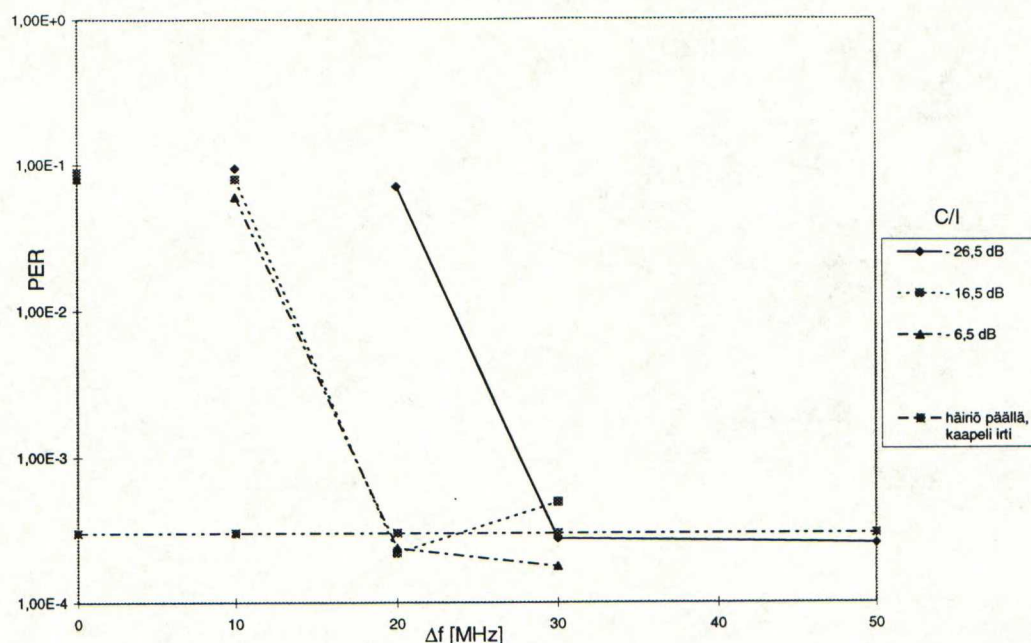
standardin määrittelystä poiketen käyttämään varsinaisen signaalin peilikuvaa taajuustasossa. Tämä siksi, että käytetty ohjelma tunnisti kolmannen lähteen ja keskeytti mittauksen, kun häiriösignaali kytkettiin päälle.



Kuva 21. Pienen taajuuseron tuottava sekoitin.

Mittauksessa mitattiin pakettivirhesuhdetta kanavavälin ja häiriötehotason funktiona. Mittaustulokset on esitetty seuraavassa kuvassa 22. Siinä näkyy signaalin ja häiritsevän viereisen kanavan kanavavälin vaikutus pakettivirhesuhteeseen eri viereisen kanavan signaalin tehotasoilla varsinaiseen signaaliin verrattuna. Kuvassa on esitetty myös pakettivirhesuhde, kun linkkiä mitattiin häiriön ollessa päällä, mutta kaapeli ei ollut kytkettynä häiriölähteen signaalilinkille yhdistävään laajakaistaiseen suuntakytkimeen.

TKK SÄHKOTEKNIKA.  
OSASTON KIRJASTO  
OTAKAARI 5 A  
02150 ESPOO



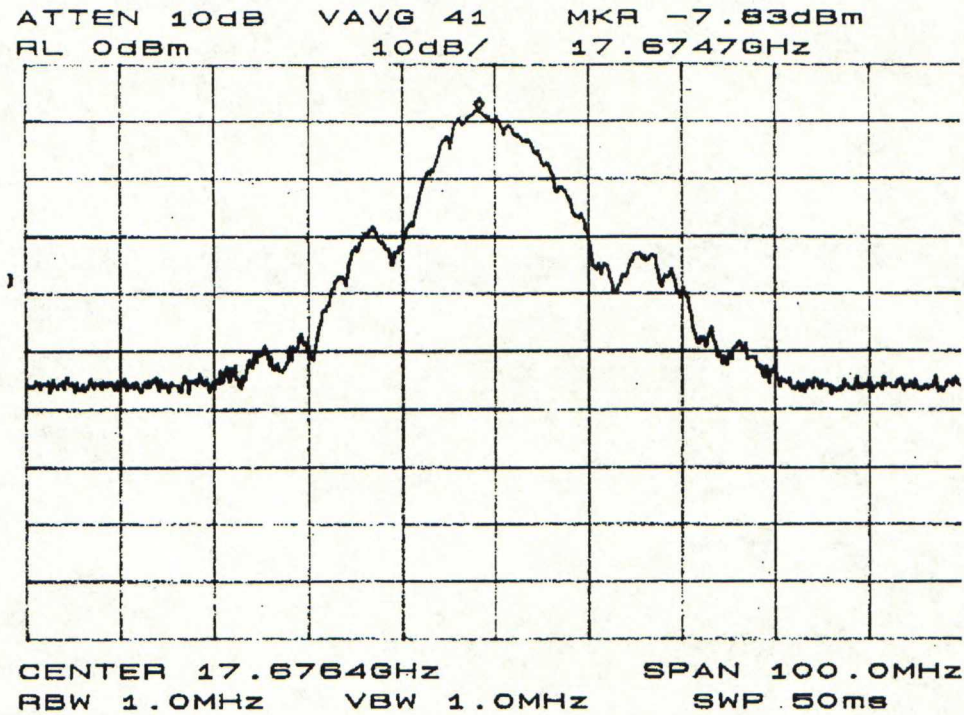
Kuva 22. Pakettivirhesuhde (PER) kanavavälin funktiona eri C/I-tasoilla.

Mittauksesta voidaan todeta mitattavien korttien täyttävän ainakin vaatimuksen, jossa viereisellä kanavalla (30 MHz päässä) on tehotasoltaan 26,5 dB voimakkaampi samalla tavoin moduloitu signaali. IEEE-standardin vaatimuksen täyttymisestä, jossa systeemin pitäisi kestää vielä lähes kymmenen desibeliä suuritasoisempi häiriösignaali, ei voida tämän mittauksen perusteella varmuudella todeta mitään.

## 5.2 Ylössekoitetun signaalin spektrimuoto

Mittauksessa on käytetty Hewlett Packardin spektrianalysointia (HP 8562A). Resoluutio- ja videokaistanleveytenä on mittauksessa käytetty 1 MHz kaistanleveyttä. Spektrianalysointissa ETSI:n vaatimusten mukaan käytettiin 50 pyyhkäisyn keskiarvoistusta. Tämän lisäksi jouduttiin pienen pulssisuhteen vuoksi lisäämään vielä MaxHold-asetus, koska keskiarvoistus ei vielä näin lyhytkestoisilla pulsseilla antanut todellista spektrimuotoa. Kuvassa 23 on esitetty 17,67 GHz taajuudelle ylössekoitetun signaalin ulostulospektri. Kuvasta nähdään, että sivunauhatasot ovat nousseet huomattavasti verrattuna alkuperäisen WaveLAN-kortin tuottaman signaalin ulostulospektriin (kappale 5.1). Tämä johtuu erittäin epälineaaraisella alueella toimivasta ylössekoituksesta. Spektrimuoto täyttää silti täpärästi ETSI:n standardin määrittelemän -20 dBr sivunauhavaatimuksen mitatuilla yksilöillä, kun mittauksessa on käytetty 1 MHz:n resoluutiokaistanleveyttä.





Kuva 23. Ylössekoitetun signaalin spektrimuoto 17,67 GHz:n taajuudella.

### 5.3 Häiriölähteet taajuuskaistan ulkopuolelle

Häiriölähteitä taajuuskaistan ulkopuolelle ei havaittu. Aaltoputkirakenteinen kaistanpäästösuodatin eliminoi tehokkaasti päästökaistan ulkopuolella olevat signaalit. Aaltoputkirakenteista kapeakaistaista kaistanpäästösuodatinta on käytettävä vaimentamaan referenssikideoskillaattorista aiheutuvia häiriöpiikkejä noin 100 MHz:n päässä RF-signaalitaajuudesta. Erityisesti kaikki aaltoputkirakenteiden katkوتاajuuden  $f_{c,TE10}$  alapuolella olevat signaalit vaimentuvat täysin, koska aaltoputki ei päästä rajataajuutensa alapuolella olevia signaaleja lävitseen. Tämä katkوتاajuus käytetyille aaltoputkille on 14,08 GHz. Näitä aaltoputkirakenteita ovat muuntimen RF-osissa käytetty aaltoputkirakenteinen kaistanpäästösuodatin ja aaltoputkiulostulo antennille.

Häiriölähteiden kannalta ongelmataajuus on paikallisoskillaattoritaajuus 15,2 GHz. Käytetty balansoitu sekoitus ja edellä mainittu kaistanpäästösuodatin vaimentavat tätäkin taajuutta tehokkaasti, eikä signaalikaistalla havaittu harmonisia sekoitustuloksia. Mahdollisten häiriöiden harmonisia monikertoja ei päästy mittaamaan käytetyn spektrianalysaattorin ylärajataajuuden 26 GHz takia.



## 5.4 Taajuusmuuntimen sekoitusvaimennus

Taajuusmuuntimen sekoitusvaimennus IF-taajuudelta 2,46 GHz:n RF-taajuudelle 17,67 GHz mitattiin molemmille sekoittimille (*sekoittimelle 1* ja *sekoittimelle 2*).

Sekoitusvaimennus mitattiin lähiverkkoyhteyden käyttämän signaalin avulla mittaamalla signaalin keskimääräistä tehoa sekoittimen sisäänmenosta ja ulostulosta. Tästä voidaan pulssisuhde tuntemalla laskea varsinainen signaalin teho ja myös signaalin kokema vaimennus. Aluksi mitattiin keskimääräinen sisäänmenotehotaso HP:n laajakaistaisella analogisella tehomittarilla (HP 435B Power Meter) ja tehoanturilla. Sisäänmenotehtosoksi mitattiin noin +15,6 dBm 2,46 GHz:n taajuudella. Tämän jälkeen mitattiin keskimääräinen ulostulotehotaso 17,67 GHz taajuudella, jonka mitattiin olevan noin -0,2 dBm.

Seuraavassa taulukossa on esitetty *sekoittimen 2* läpi menneen signaalin kokema keskimääräisen tehon vaimennus IF-taajuudelta 2,46 GHz RF-taajuudelle 17,67 GHz.

*Taulukko 4. Sekoittimen 2 IF  $\Rightarrow$  RF sekoitusvaimennus.*

Keskim. tehotaso 2,460 GHz (2in)	15,6	dBm
Keskim. tehotaso 17,676 GHz (2out)	-0,2	dBm
Sekoitusvaimennus IF->RF	15,8	dB

Sekoitusvaimennus mitattiin myös syöttämällä sisäänmenoon jatkuva sinimuotoinen signaali ja mittaamalla signaalin kokema vaimennus ulostulossa. Jatkuvalle sinimuotoisella signaalilla mitattaessa oli mahdollista mitata vaimennusta eri sisäänmenosignaalin tehotasoilla (0-20 dBm). Sekoitusvaimennuksen ei kuitenkaan ylössekoituksessa huomattu riippuvan IF-signaalin tehotasosta. Jatkuvalle signaalilla mitattu sekoitusvaimennus noudatteli keskimääräisillä tehotasoilla tehtyjen mittausten tuloksia. Näin sekoitusvaimennus IF-taajuudelta RF-taajuudelle *sekoittimella 2* on noin 16 desibeliä. Virhearvio mittaukselle on noin  $\pm 0,5$  dBm.

*Sekoittimelle 1* samoilla mittausjärjestelyillä ja keskimääräisillä tehotasoilla mitattu sekoitusvaimennus on esitetty seuraavassa taulukossa.



Taulukko 5. Sekoittimen 1 IF  $\Rightarrow$  RF sekoitusvaimennus.

Keskim. tehotaso 2,460 GHz (1in)	15,8	dBm
Keskim. tehotaso 17,676 GHz (1out)	1,4	dBm
<b>Sekoitusvaimennus IF-<math>\rightarrow</math>RF</b>	<b>14,4</b>	<b>dB</b>

Tehomittarilla mitatuksi sisäänmenotehtotasoksi mitattiin noin +15,8 dBm 2,46 GHz:n taajuudella. Edellisestä mittauksesta eroava signaalitehotaso johtuu eri signaalilähteestä eli eri WLAN-kortista. Tämän jälkeen mitattiin keskimääräinen ulostulotehotaso 17,67 GHz taajuudella, jonka mitattiin olevan noin +1,4 dBm. Virhearvio mittauksessa oli sama noin  $\pm 0,5$  dBm. Näin sekoitusvaimennukset eri sekoittimille eroavat noin reilun desibelin ollen *sekoittimessa 2* noin 16 desibeliä ja *sekoittimessa 1* vajaa 15 desibeliä. Tämä ero näkyy myös myöhemmissä mittaustuloksissa.

Sekoitusvaimennus toiseen suuntaan, RF-taajuudelta 17,67 GHz IF-taajuudelle 2,46 GHz, on hankala mitata edellä kuvatulla tavalla. Tämä johtuu kaistanpäästösuotimen puuttumisesta alassekoituksen jälkeen, jolloin kaikki sekoitustulokset, paikallisoskillaattorisignaali ja näiden harmoniset pääsevät häiritsemään mittausta. Kaistanpäästösuotimen puuttuminen alassekoituksen jälkeen johtuu varsin jyrkästä varsinaisella WLAN-kortilla olevasta kaistanpäästösuodattimesta, joten varsinaisessa alassekoittimessa suodatusta ei enää tarvita. Tästä syystä alassekoitusvaimennus RF-taajuudelta IF-taajuudelle on jouduttu mittaamaan suoraan tehospektrin spektriviivojen huippuarvoja vertaamalla. Tämä mittaus on tehty ainoastaan sekoittimelle 2, mittauksessa käytettiin samaa spektrianalysaattoria kuin edellä (HP 8562A).

Taulukko 6. Sekoittimen 2 RF  $\Rightarrow$  IF sekoitusvaimennus.

SSB tehotaso 17,676 GHz (2in)	-42,830	dBm
SSB tehotaso 2,460 GHz (2out)	-57,000	dBm
<b>Sekoitusvaimennus RF-<math>\rightarrow</math>IF</b>	<b>14,2</b>	<b>dB</b>



Sekoitusvaimennukseksi siis mitattiin noin 14 dB, virhearvio tehdyille mittaukselle on noin  $\pm 1,0$  dB.

### 5.5 Paikallisoskillaattorilta vaadittava taajuusstabiilius

Standardin mukaan langattoman lähiverkkokortin lähettimen keskitaajuuden  $f_c$  taajuustoleranssi on  $\pm 25$  ppm. Teoreettisesti tästä voidaan laskea vaadittava taajuusstabiilius, jos stabiiliusvaatimus pysyy samana sekoituksesta johtuvista epäideaalisuuksista huolimatta. Signaali siirretään 2,46 GHz:n taajuudelta ylemmälle taajuudelle sekoittamalla se paikallisoskillaattorisignaalilla  $f_{LO} = 15,2$  GHz. Paikallisoskillaattoritaajuus  $f_{LO}$  on noin 6,2-kertainen lähtötaajuuteen verrattuna. Tämän mukaan suhteellinen paikallisoskillaattorin taajuusstabiilius vaatimus (ppm) siis pitäisi olla

$$\Delta f_{LO} = 25/6,2 \text{ ppm} = 4,0 \text{ ppm} \quad (10)$$

### 5.6 Vastaanottimen kynnystaso

Vastaanottimen kynnystasomittauksen määrittely IEEE 802.11-standardin mukaan on esitetty edellä (kappaleessa 3.1.1). Standardin määrittelyistä poiketen on tässä mittauksessa mitattu kuitenkin pakettivirhesuhdetta eri tehotasoilla bittivirhesuhteen asemasta.

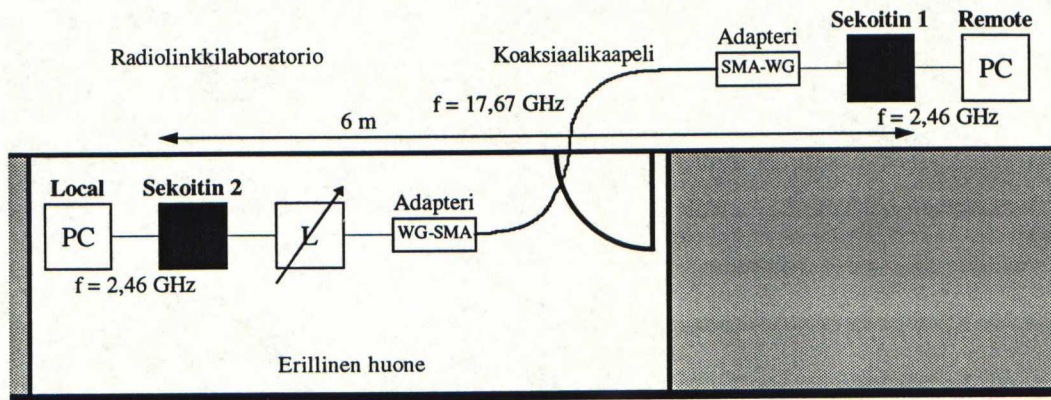
#### Mittausjärjestelyt

Vastaanottimen kynnystaso eli minimiherkkyystaso on mitattu Tele Engineeringin Radiolinkkilaboratoriossa Lauttasaarella joulukuussa 1995. Yhteyttä mitattiin PTPDIAG-linkkiyhteyden mittausohjelman avulla mittaamalla pakettivirhesuhdetta systeemivaimennuksen funktiona. Tele Engineeringissä suoritettujen kynnystasomittausten mittausjärjestelyt on esitetty kuvassa 24.

Signaalilähteet kytkettiin yhteen kahdella hyvälaatuisella Suhnerin koaksiaalikaapelilla. Tässä kaapelissa 18 GHz:n taajuus kulkee valmistajan ilmoituksen mukaan kohtuullisella vaimennuksella. Tämän jälkeen signaalilähteet erotettiin erillisiin huoneisiin, mittauksen aikana tilat olivat täysin erotetut toisistaan. Koaksiaalikaapelin vaimennukseksi valmistaja antaa yhteensä 4 dB. Mittauksessa tarvittavien aaltoputki-koaksiaali siirtymien vaimennuksiksi mitattiin noin 0,5 dB.

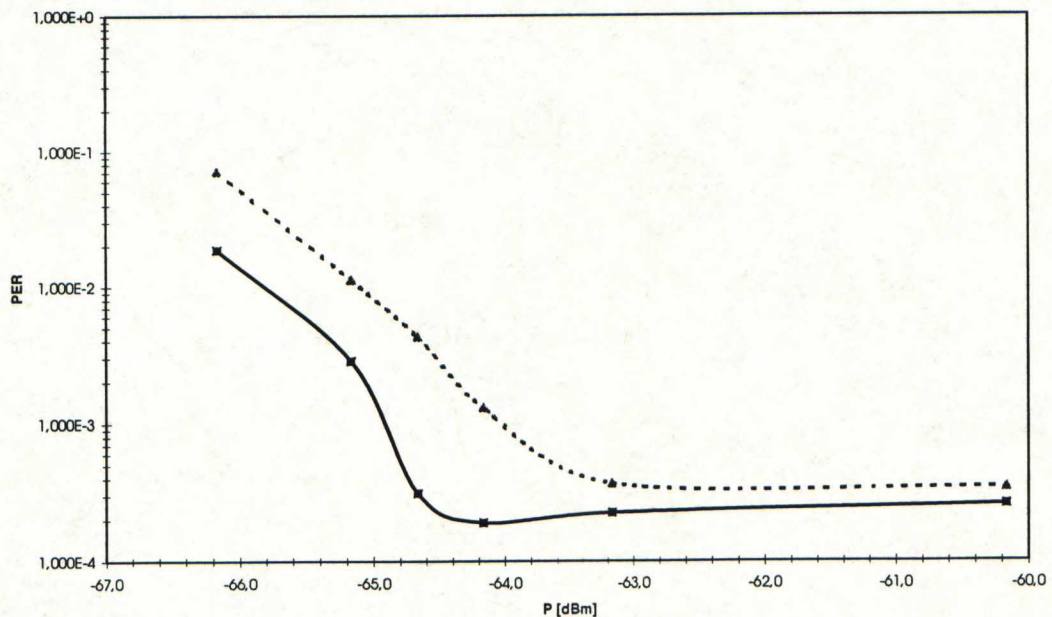


Linkillä on vaimennusta yhteensä säädettävän vaimentimen lisäksi siis 5 dB. Säädettävä vaimennin on tässä tapauksessa radiolinkkien mittauksissa käytetty tarkka aaltoputkivaimennin, jonka säätöalue ulottuu nolasta desibelistä yli 60 desibeliin.



Kuva 24. Kynnystasomittauksen mittausjärjestelyt.

### Mittaustulokset



Kuva 25. Kynnystasomittauksen tuloksia, katkoviiva ja kolmiot kuvaavat sekoitinta 1 ja yhtenäinen viiva ja neliöt kuvaavat sekoitinta 2.

Kuvassa 25 on esitetty mittauksien tulokset. Kuvassa on eritelty eri linkkisuunnat. Edellä mitattujen järjestelyiden kuvassa 24 esitetyt taajuusmuuntimet on yksilöity nimillä

*sekoitin 1* ja *sekoitin 2*. Tässä kuvassa suunta *sekoittimelta 1 sekoittimelle 2* on merkitty neliöillä, toinen linkkisuunta on merkitty vastaavasti kolmioilla.

Kuvasta 25 nähdään, että vaikka taajuusmuuntimille mitattiin eri sekoitusvaimennukset, kynnystasomittauksen tulos on sekoittimilla mittaus-tarkkuuden rajoissa suunnilleen sama. Mittauksiin virhelähteenä vaikutti eri sekoittimien erilaiset vastaanotto-olosuhteet eri tiloissa, radiolinkkilaboratorion häiriöt saattoivat vaikuttaa enemmän *sekoittimeen 1*.

Minimiherkkyystaso saadaan kuvasta. Aikaisemmin kappaleessa 5.1 saatiin standardin mukaisesta vaatimuksesta bittivirhesuhdetta  $10^{-5}$  vastaava pakettivirhesuhde  $1,1 \cdot 10^{-1}$ . Katsomalla tätä pakettivirhesuhdetta vastaava tehotaso heikommin suoriutuneesta linkistä (merkitty katkoviivalla), saadaan kynnystasoksi noin -66 dBm. Huononnusta WaveLAN-kortin myös kappaleessa 5.1 mitattuun kynnystasoon -82 dBm on siis noin 16 dB.

## 5.7 Taajuusmuuntimen kohinaluku

Taajuusmuuntimen kohinalukua ei voida mitata, koska langattoman lähiverkkokortin kohinalukua ei tunneta. Vastaanottimen kohinaominaisuuksista voidaan todeta vain kohinaluvun huononnus, jonka voidaan arvoida olevan taajuusmuuntimen sekoitusvaimennuksen suuruinen. *Sekoittimen 2* sekoitusvaimennus mitattiin edellä (kappale 5.4), sekoitusvaimennukseksi saatiin noin  $(14 \pm 1,0)$  dB.

## 5.8 Suurin saavutettava solusäde tukiasemalta liittäjälle

Solun maksimisäde määrää tukiaseman peittoalueen. Varsinkin verkon toteutuksen alkuvaiheessa, jolloin tilaajatiheys on pieni, on tärkeää saavuttaa tarpeeksi suuri solusäde. Tämä mahdollistaisi riittävän määrän tilaajia jokaista tukiasemaa kohti. WaveLAN-lähiverkkokorttien avulla toteutettavan verkon tapauksessa ensimmäinen solun liittijämäärää rajoittava tekijä on 2 Mbit/s siirtonopeus jaettuna käyttäjien kesken, jolloin suuresta solusäteestä ei ole paljoakaan hyötyä. Tulevien HIPERLAN-korttien kapasiteetti 10 Mbit/s on jo niin suuri, ettei se olisi ensimmäinen rajoittava tekijä, ja tällöin tarpeeksi suuri solusäde on merkittävä tekijä.



17,67 GHz taajuusalueella näköyhteys lähetys- ja vastaanottoantennin välillä on välttämätön. Suurinta saavutettavaa solun sädettä laskettaessa voidaan tällöin käyttää vapaantilan vaimennuksen kaavaa, kun oletetaan, että yhteyden Fresnelin ensimmäinen vyöhyke on vapaa.

Edellä kynnystasomittauksessa laskettu linkkiyhteyden suurin sallittu systeemi-vaimennus saadaan, kun tiedetään lähetysteho  $P_{out}$  antenniportissa, joka on noin 1 dBm ja mitattu kynnystaso -66 dBm.

$$L_{sys,max} = +1 \text{ dBm} - (-66 \text{ dBm}) = 67 \text{ dB} \quad (11)$$

Vapaan tilan vaimennus  $L_0$  saadaan, kun maksimisysteemivaimennukseen lisätään antennivahvistukset  $G_t$  ja  $G_r$ . Suurin saavutettava teoreettinen solunsäde on esitetty seuraavassa taulukossa kahdella eri liittyjän suuntaavalla lautasantennivaihtoehdolla. Pienempi antenni on halkaisijaltaan noin 30 cm (12'') ja suurempi noin 46 cm (18'') (Millitech).

Taulukon 7 laskelmassa on käytetty lähetystehona WLAN-kortin mitattua lähetystehoa +16 dBm. Tästä lähetystehosta on vähennetty taajuusmuuntimen ylössekoitusvaimennus noin 15 dB (*sekoittimen 1 ja sekoittimen 2 keskiarvo*), joten lähetysteho 17,67 GHz:n taajuudella antenniportissa on +1 dBm. Kun vastaanottimen kynnystasoksi on mitattu -66 dBm ja tiedetään käytettävissä oleva antennivahvistus, voidaan laskea linkkibudjetti. Antennivahvistukset ovat liittyjän päässä joko 33 dBi pienemmällä 30 cm:n lautasantennilla tai 37 dBi suuremmalla 46 cm:n lautasantennilla. Tukiasemalla on käytössä sektoriantenni, jonka antennivahvistus on 21 dBi. Laskelmassa on varattu monitie-etenemisen häipymävara 5 desibeliä ja sadevaimennuksen häipymävara 2 dB kilometriä kohti. Varatun häipymävaran on arvioitu riittävän lyhyillä etäisyyksillä ja yhteyksillä, joissa kanavan virheettömyys koko ajan ei ole tarpeen. Nopeat häiriövaimennukset kestävät ainoastaan lyhyen aikaa ja protokolla lähettää kadonneet paketit uudestaan.

*Taulukko 7. Kahdella eri suuntaavalla antennilla laskettu linkkibudjettilaskelma ja suurin teoreettinen solunsäde.*

Lähetysteho $P_t$ (2.460 GHz)	16,0	dBm	16,0	dBm
Sekoitusvaimennus IF $\rightarrow$ RF	15,0	dB	15,0	dB
Teho antenniportissa $P_{out}$	1,0	dBm	1,0	dBm
Vastaanottimen kynnystaso $P_r$	-66,0	dBm	-66,0	dBm
$G_t$ (käyttäjän antenni, 12" ja 18")	33,0	dBi	37,0	dBi
$G_r$ (tukiaseman antenni)	21,0	dBi	21,0	dBi
<b>Linkkibudjetti</b>	<b>121,0</b>	<b>dB</b>	<b>125,0</b>	<b>dB</b>
Häipymävara, monitie-eteneminen	5,00	dB	5,00	dB
Häipymävara, sadevaimennus (2 dB/km)	1,42	dB	2,09	dB
<b>Häviöt yhteensä</b>	<b>6,4</b>	<b>dB</b>	<b>7,1</b>	<b>dB</b>
<b>Vapaantilan vaimennus <math>L_o(r)</math></b>	<b>114,6</b>	<b>dB</b>	<b>117,9</b>	<b>dB</b>
RF taajuus $f$	17,67	GHz	17,67	GHz
$L_o(r)=92.6+20\log(f)+20\log(r)$				
<b>=&gt; Solun säde <math>r</math></b>	<b>0,711</b>	<b>km</b>	<b>1,043</b>	<b>km</b>

Linkkibudjetin laskemisen ja häipymävaran huomioimisen jälkeen saadaan edellä esitettyä vapaan tilan vaimennuksen kaavaa käyttäen suurin saavutettava solun säde. Pienempää lautasantennia käytettäessä säde on noin 700 metriä, suuremmalla 46 cm:n lautasantennilla solusäde kasvaa noin kilometriin.



## 6 KUSTANNUSTARKASTELUJA

---

Uusien multimediapalvelujen tarjoaminen kuluttajille tarjoaa suurta liiketoiminnallista potentiaalia nykyisille verkko-operaattoreille. Palvelun tarjoaminen vaatii kuitenkin usein hyvin suuria alkuinvestointeja ja sisältää siten suuria riskejä.

Tässä kustannus- ja tulolaskelmassa on käytetty TITAN (Tool for Introduction scenarios and Techno-economic evaluation of Access Networks) -työkalua, joka on Euroopan Unionin RACE-projektissa (R2087) kehittämä liityntäverkkojen tekno-ekonomisten kustannusten laskentaan tehty työkalu [11]. Työkalulla voidaan analysoida liityntäverkon investointikustannuksia ja potentiaalisia tulolähteitä ja tutkia näiden riippuvuutta eri tekijöistä. Näitä tekijöitä voivat olla palvelun penetraation kehitys, palvelusta vaadittu veloitus eli tariffi, tariffien evoluutio, palvelun arkkitehtuuri, verkon elementtien kustannukset ja niiden hintaevoluutio.

Kaikki laskelmat perustuvat mahdollisimman realistisiin oletuksiin palvelun penetraatiosta, tariffeista ja verkon elementtien hinnoista. Oletuksia tehdessä on käytetty apuna viitettä [12] sekä ISDN- ja Internet-yhteyksiä tarjoavien yritysten hinnastoja. Näitä oletuksia käyttäen voidaan laskea liityntäverkkoon tehdyt investoinnit, kassavirta ja kassavarat 10 vuoden laskenta-ajalla. Asettamalla tietyt tavoitteet näille arvoille on mahdollista määritellä muuttujana pidettävä langattoman lähiverkkoliitynnän liittyjän vastaanottimen (suuntaava antenni ja taajuusmuunnin) tavoitehinta, joka mahdollistaisi kaupallisesti kannattavan palvelun tarjoamisen.

### 6.1 Verkon tarjoamat palvelut

Verkko tarjoaa langatonta lähiverkkopalvelua ja nopeaa tiedonsiirtoyhteyttä liittyjille. Palveluun voi sisältyä informaatiopalveluita, keskitetyn tiedostopalvelimen käyttöä, tulostuspalvelua, kotipankkipalvelua, etätyöskentelyä, sähköpostiyhteys ja kansainvälinen Internet-, WWW-, FTP- ja Telnet-yhteys. Lähitulevaisuudessa on mahdollista myös puheluliikenteen välittäminen lähiverkossa. Telecom Finland Oy ja LM Ericsson ovat kehittämässä liityntää dataverkon ja yleisen puhelinverkon välille ja puheen muuttamista IP-protokollan mukaiseksi dataliikenteeksi [13]. Tuotenimi

tälle verkkopuhelimelle on LanPhone, ja se perustuu normaaliin olemassa olevaan lähiverkkotekniikkaan.

Verkko toteutetaan ISM-alueella toimivilla lähiverkkokorteilla ja taajuusmuuntimilla. Verkko tarjoaa lähiverkkoprotokollan mukaisen jaetun kanavan, jonka siirtonopeus on 2 Mbit/s. Maksimissaan tällä kanavalla on käyttäjiä yhtä monta kuin liittyjien määrä solua kohti eli tässä laskelmassa 30 yhtäaikaista käyttäjää. Näin käyttäjällä on käytössään huonossakin tapauksessa (kaikki liittyjät käyttävät palvelua yhtäaikaan) kapasiteetti, joka voidaan arvioida olevan useita kymmeniä kilobittejä sekunnissa. Keskimäärin käyttäjällä on kuitenkin huomattavasti enemmän kapasiteettia käytössään (enemmän kuin 500 kbit/s), koska liittymän kuukausittaiset käyttötunnit liittymää kohti on oletettu olevan ainoastaan muutama tunti kuukaudessa (4 tuntia/kuukaudessa).

## 6.2 Veloitus

Tässä laskelmassa puhuttaessa tilaajan maksamasta rahamäärästä ja tariffeista tarkoitetaan niistä liittytäväverkolle tulevaa osuutta. Siirtoverkon osuus on jätetty laskelmasta pois. Siirtoverkon digitalisointi ja siitä seurannut luotettavuuden lisääntyminen on vähentänyt huomattavasti niiden käyttökustannuksia, jolloin suurin osa asiakkaan maksamista tariffeista tulee liittytäväverkosta ja erityisesti sen viimeisestä kilometristä. Asiakkaan todellisuudessa maksama kokonaistariffi on kuitenkin jonkin verran suurempi kuin tässä kappaleessa on esitetty. Palvelun veloitus on jaettu kolmeen osaan:

1. Kertaluonteiseen liittymismaksuun [mk]
2. Kuukausittaiseen kuukausimaksuun [mk/kuukausi]
3. Minuuttikohtaiseen veloitukseen, joka perustuu palvelun käyttöön [mk/minuutti]

Seuraavassa taulukossa 8 on eritelty palvelun oletettu veloitus eli tariffit tarkastelujakson alussa vuonna 1996 Suomen markkoina.



*Taulukko 8. Langattoman lähiverkkoyhteyden oletetut tariffit ja kustannukset ensimmäisenä tarkasteluvuonna.*

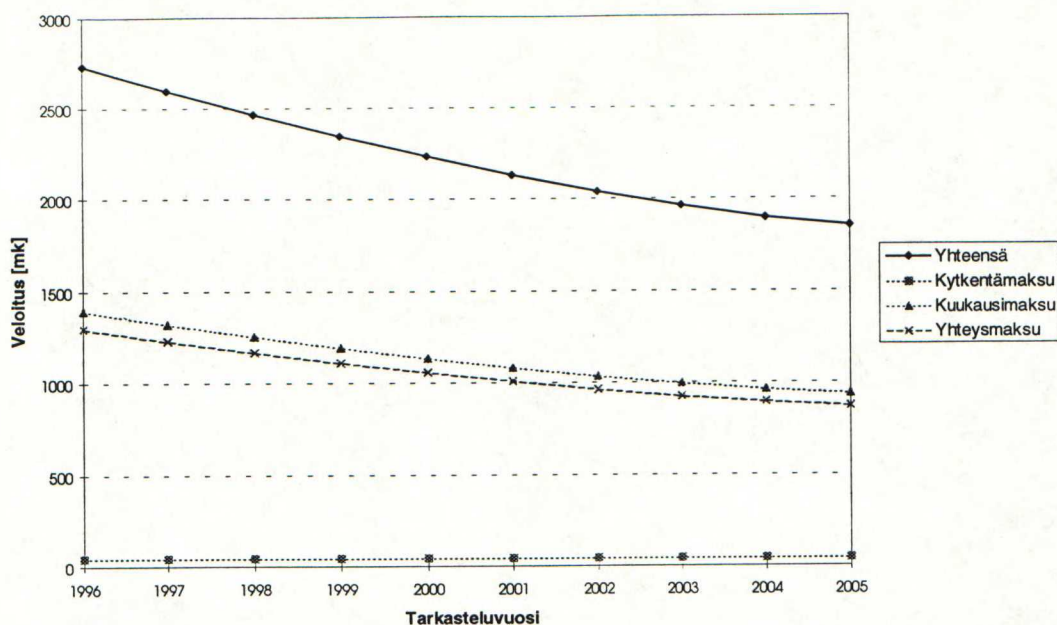
Kustannukset	
Langaton lähiverkkokortti [mk]	3600,00
Liittymismaksu [mk]	450,00
Kuukausimaksu [mk/kuukausi]	116,00
Yhteismaksu [mk/minuutti]	0,45

Liittymismaksu veloitetaan liittyjältä kertamaksuna, mutta laskelmassa se on jaettu tasan kymmenen vuoden periodille, jolloin tästä aiheutuu vuosittain 45 markan menoera liittyjälle. Kuukausimaksusta taas aiheutuu liittyjälle 1392 markan menoera vuonna 1996.

Keskimääräisen käyttäjän on arvioitu käyttävän palvelua 4 tuntia kuukaudessa. Tämä on melko vähän, jos ajattelee tämän hetkistä käsitystä tuntikausia päivittäin Internet-verkossa aikaansa viettävästä 'tietoverkko-surffarista'. Koska liittymässä kuitenkin on käytössä aikaveloitus, liittymän käyttö rajoittuu suurimmaksi osin sen hyötykäyttöön. Neljässä tunnissa kuukaudessa keskimääräinen liittymän hyötykäyttäjä ehtii hoitamaan pankkiasiansa ja lukemaan sähköpostiviestinsä varsin hyvin.

Aikaveloituksesta aiheutuu liittyjälle 1296 markan menoera vuonna 1996. Yhteensä liittyjältä ensimmäisenä vuotena veloitettu rahamäärä on 2733 markkaa. Kuvassa 26 on esitetty yksittäiseltä liittyjältä vuodessa veloitettun kokonaisrahamäärän kehitys markkoina oletetuilla tariffeilla.

Informaatiopalvelun kuukausimaksun ja aikaveloitusmaksun tariffien on arvioitu laskevan noin 5% vuodessa, joka alentaa tariffeja 10 vuoden aikana noin 32%. Lisäksi liittyjältä vaaditaan langaton lähiverkkokortti, jonka hinta ensimmäisenä tarkasteluvuonna on 3600 markkaa ja hintakehitys kuvan 30 mukainen.



Kuva 26. Liittyjän maksamien tariffien hintakehitys.

Vertailuna ja lisäinformaationa esitetään ISDN-yhteyden kustannukset Suomessa 1.1.1996 eräältä verkko-operaattorilta.

Taulukko 9. HPY:n yksittäisliittymien ISDN-yhteyksien hinnat Suomessa 1.1.1996 ja ISDN-datakortin kustannukset.

Kustannukset	HPY
ISDN-datakortti [mk]	3660,00
Käyttöönottomaksu [mk]	451,00
Kuukausimaksu [mk/kuukausi]	116,00
Paikallispuhelumaksu (ppm) [mk/minuutti]	0,104 <sup>1</sup>

ISDN-yhteyden kustannuksiin on lisättävä myös päätelaitteiden hinnat, jotka ovat vielä toistaiseksi melko kalliita. Taulukkoon otettu ISDN-datakortti on IBM:n valmistama WaveRunner Digital Modem (ISA- tai MCA-väylä), jonka hinta joulukuussa 1995 on ollut taulukon mukainen. Datakorttien hinnat vaihtelevat ominaisuuksista riippuen 2500 ja 6000 markan välillä [14].

<sup>1</sup> Alle kolmen minuutin puhelut 26,8 p/puhelu



Internet-yhteyttä langattoman lähiverkkopalvelun tai ISDN:n avulla haluavan on lisättävä kokonaiskustannuksiinsa myöskin Internet-palveluntuottajien veloittamat palveluhinnat. Näistä on esitetty esimerkki seuraavassa taulukossa, jossa on kahden Internet-yhteyttä tarjoavan suuren yrityksen palveluhinnat vuoden 1996 alussa, kun yhteysnopeutena käytetään ISDN-yhteyttä siirtonopeudella 64 kbit/s ja halutut palvelut ovat kansainväliset WWW-, FTP- ja Telnet-yhteys sekä sähköposti.

*Taulukko 10. Internet-yhteyden tariffeja kahdelta palvelun tarjoajalta vuonna 1996.*

Palvelumaksut	Telecom Finland Oy	Finnet Oy
Liittymismaksu [mk]	122,00	149,00
Kuukausimaksu [mk/kuukausi]	50,00	73,20
Yhteysmaksu [mk/minuutti]	0,21 <sup>2</sup>	0,366

Jos liittyjä käyttää yhteyttä 4 tuntia kuukaudessa pääasiassa iltaisin ja liittymämaksu jaetaan tasan 10 vuoden ajalle, näillä tariffeilla pelkän Internet-palvelun aiheuttamat kustannukset liittyjälle vuodessa olisivat 1217 mk/vuosi tai 1947 mk/vuosi.

### 6.3 Verkon rakenne

Tässä laskelmassa langattoman lähiverkon oletetaan koostuvan ainoastaan yhdestä tukiasemasta, jota sektoroidaan liittyjien määrän noustessa. Näin vältetään monesta tukiasemasta koostuvan verkon taajuussuunnittelu ja ongelmalliset häiriökysymykset. Ongelmaksi muodostuu verkon palvelun mainostaminen ja myyminen potentiaalisille asiakkaille, jos koko alueen kattavaa verkkoa ei ole tarjolla. Myyjän on hankala myydä tuotetta tai palvelua, jos myydessä vallitsee epävarmuus siitä, pystytäänkö asiakkaalle lopulta kuitenkin tarjoamaan kyseistä tuotetta tai palvelua.

Verkkoa on mallinnettu EU:n RACE 2087-projektissa kehitetyn TITAN-työkalun avulla. Potentiaalisten asiakkaiden määrää laskettaessa on laskettu Helsingin maapinta-alaa, väkilukua ja keskimääräistä talouksien kokoa vastaava kotitalouksien

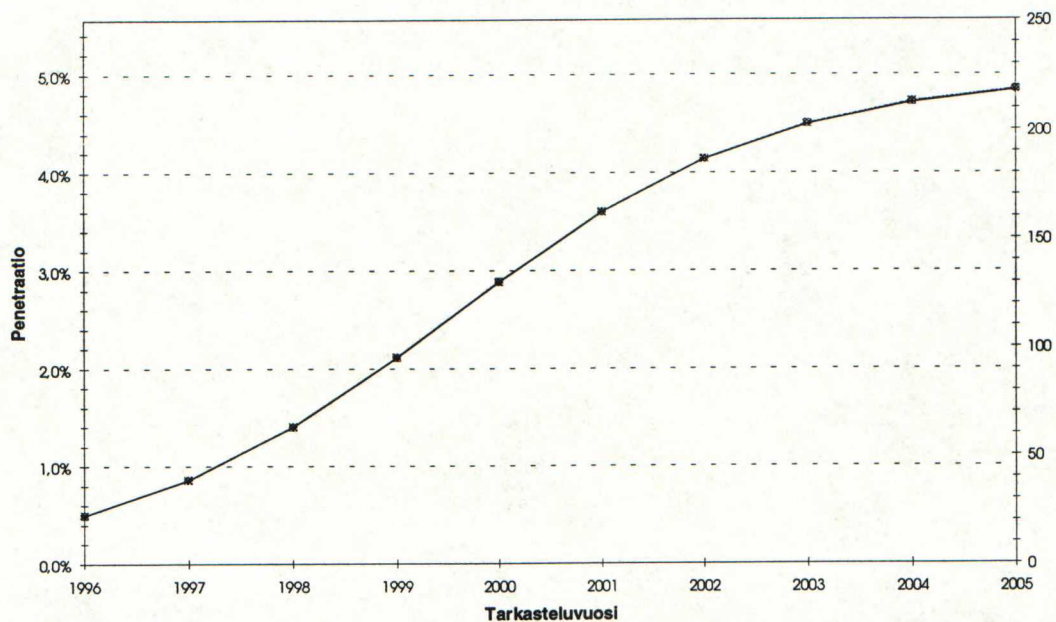
<sup>2</sup> Yhteysmaksu arkisin kello 7-18 0,45 mk/min ja muina aikoina 0,21 mk/min

määrä neliökilometriä kohden [15]. Näin keskimääräiseksi kotitaloustiheydeksi  $n_{tal}$  [taloutta/km<sup>2</sup>] saadaan:

$$n_{tal} = (515765 \text{ as.}) / (185 \text{ km}^2 \cdot 1,95 \text{ as./talous}) = 1430 \quad (12)$$

Tässä laskelmassa verkko rakentuu yhdestä tukiasemasta, jonka säde  $R = 1 \text{ km}$ . Edellä on laskettu oletettu potentiaalisten asiakkaiden määrä neliökilometriä kohden, jolloin ympyränmuotoisen tukiaseman peittoalueen sisällä olisi  $n_{as}$  kappaletta potentiaalisia asiakkaita

$$n_{as} = n_{tal} \cdot \pi \cdot R^2 = 4500 \quad (13)$$



Kuva 27. Liittyjien penetraatio ja potentiaalisen asiakastiheyden mukainen liittyjien lukumäärä tarkasteluvuosittain.

Kun verkon peittoalueella olevien potentiaalisten asiakkaiden määrä ja palvelun penetraatio tunnetaan, voidaan laskea liittyjien määrä. Palvelun penetraatiokehityksen on oletettu nousevan 0,5 prosentista viiteen prosenttiin kymmenen vuoden aikana S-käyrää noudattaen. Tämän oletuksen mukainen liittyjien lukumäärä tarkasteluvuosittain on esitetty kuvassa 27.

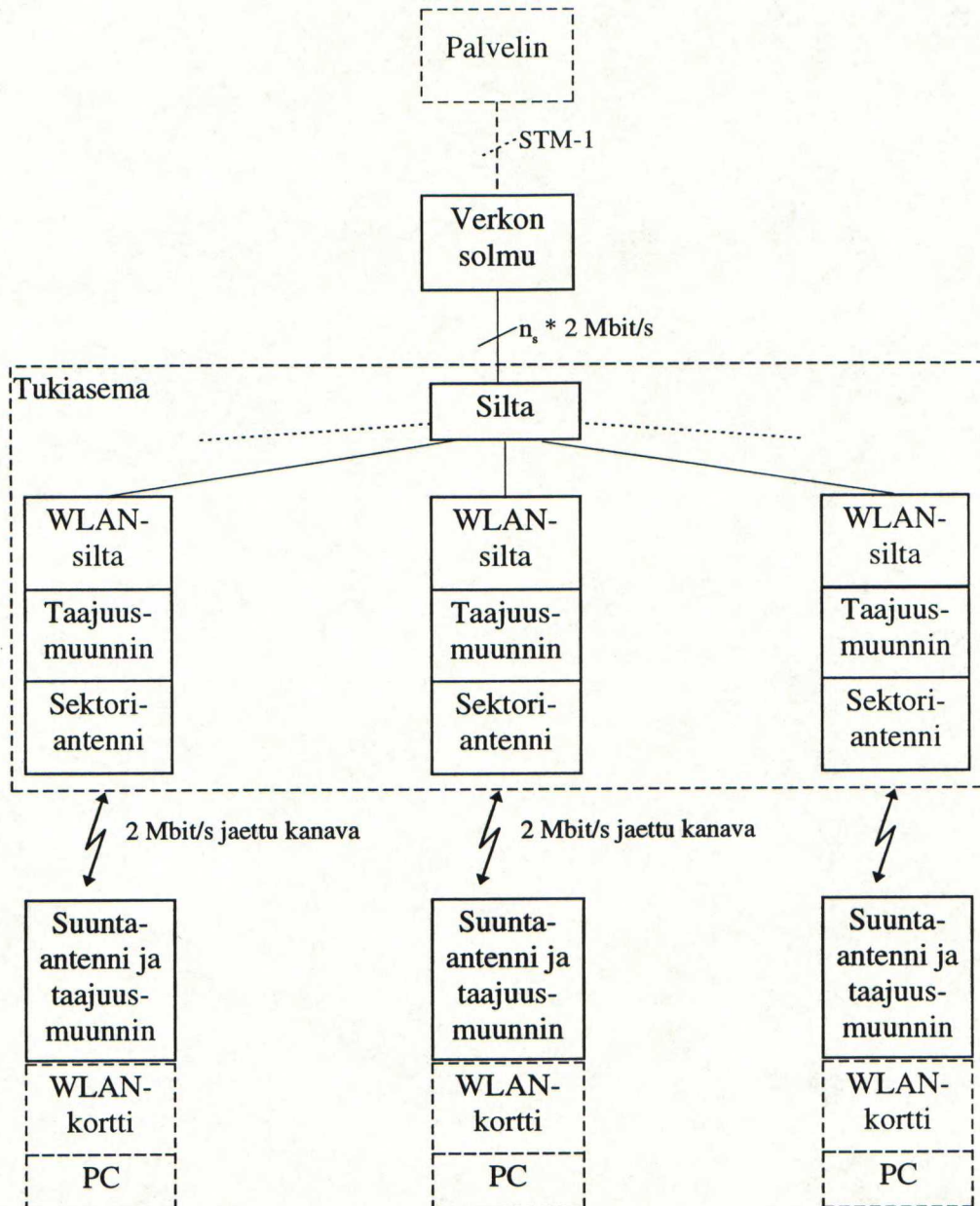


Verkon rakenteesta puhuttaessa tässä käsitellään ainoastaan liityntäverkkoa, siirtoverkkoon tehtävät investoinnit on jätetty kokonaan tarkastelun ulkopuolelle. Liityntäverkon rakenne voidaan jakaa tässä tapauksessa neljään osaan.

1. Yhteys  $n_s \cdot 2 \text{ Mbit/s}$  verkon solmupisteestä tukiasemalle. Tarvittava kapasiteetti määräytyy yhdessä tukiasemassa olevien sektoreiden määrästä  $n_s$ .
2. Tukiasema, jossa  $2 \text{ Mbit/s}$  -yhteys muutetaan ensin lähiverkkosillassa lähiverkkoprotokollaan sopivaksi ja sitten langattoman lähiverkon sillassa langattomaan lähiverkkoprotokollaan sopivaksi ja siirretään taajuusmuuntimessa halutulle taajuudelle ja lähetetään sektoroidun antennin kautta radiotielle.
3. Langaton yhteys  $17,6 \text{ GHz:n}$  taajuudella tukiaseman sektoriantennilta liittyjän suuntaavalle antennille, jonka siirtonopeus on langattoman lähiverkkoprotokollan mukainen jaettu  $2 \text{ Mbit/s}$  -yhteys maksimissaan 30 liittyjälle.
4. Tilaajan tiloihin sijoitettava vastaanotin eli suuntaava antenni ja taajuusmuunnin. Liittyjän tietokoneeseen asennettu langaton lähiverkkokortti on tässä laskelmassa asiakkaan omaisuutta.

Verkon rakenne palvelimelta liittyjän tietokoneelle asti on esitetty kuvassa 28, jossa liityntäverkkoon kuuluvat komponentit on esitetty yhtenäisellä viivalla ja siirtoverkkoon tai asiakkaalle kuuluvat komponentit katkoviivalla.

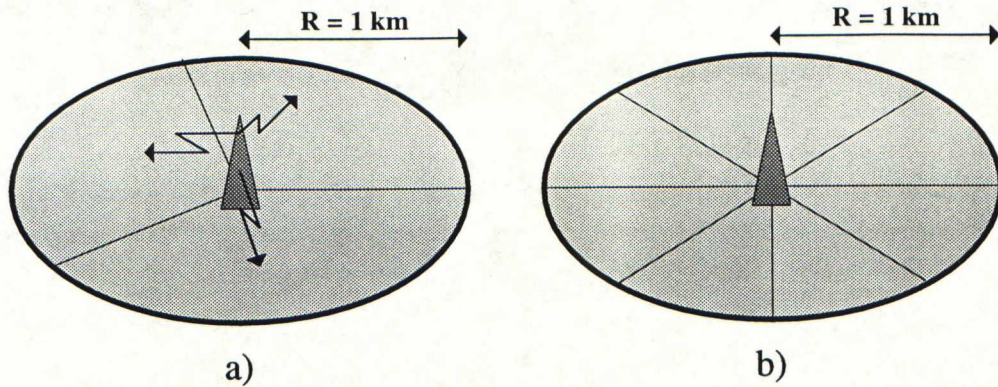
Ensimmäisenä toimintavuotena tukiasema on sektoroitu kolmeen  $120^\circ$  sektoriin. Tällöin tukiasema koostuu kolmesta  $120^\circ$  sektoriantennista, kolmesta taajuussekoitimesta ja kolmesta langattomasta lähiverkkosillasta, jotka yksi lähiverkkosilta kytkee  $8 \cdot 2 \text{ Mbit/s}$  -yhteydelle verkon solmupisteeseen. Kolmeen sektoriin jaetun solun kapasiteetti riittää maksimissaan 90 liittyjälle. Tällöin ensimmäisenä vuotena rakennettu verkko riittää kapasiteetiltaan oletetulla penetraatiokehityksellä vielä toisenkin toimintavuoden liittyjämäärälle.



Kuva 28. Langatonta lähiverkkopalvelua tarjoavan verkon rakenne palvelimelta liittyjälle.

Kolmantena vuotena toiminnan aloittamisesta liittyjien määrän noustessa verkon kapasiteettia on kasvatettava. Tämä tehdään sektoroimalla tukiaseman peittoalue kahdeksaan osaan, 45 asteen sektoreihin. Tukiasemaan lisätään tällöin kahdeksan 45° sektoriantennia, viisi taajuusmuunninta ja viisi langatonta lähiverkkosiltaa, käytöstä poisjääneille 120° sektoriantenneille ei laskelmassa ole oletettu jäännösarvoa lainkaan. Verkon kaksi rakennusvaihetta on esitetty seuraavassa kuvassa 29.





Kuva 29. a) Ensimmäinen vaihe, jossa tukiasema on jaettu kolmeen  $120^\circ$  sektoriin ( $n_s=3$ ). b) Toinen vaihe, jossa tukiasema käsittää kahdeksan  $45^\circ$  sektoria ( $n_s=8$ ).

#### 6.4 Verkon komponenttien kustannukset

Lähellä liittyjää oleville liityntäverkon komponenteille on käytetty saatavilla olevia mahdollisimman realistisia tämänhetkisiä hintoja. Tukiasemalta eteenpäin olevan yhteyden kustannuksia laskettaessa on muistettava, että ne jakaantuvat kaikkien käyttäjien kesken. Esimerkiksi kahdeksaan sektoriin jaetussa tukiasemassa, jossa on 30 liittyjää sektoria kohden kustannukset yhteydestä verkon solmupisteeseen jakautuvat 240 liittyjän kesken. Liityntäverkkoon tehdyistä investoinneista on merkittävää niiden aiheuttama kustannus liittyjää kohden. Tästä syystä tukiasemalta siirtoverkkoon päin olevan yhteyden kustannuksia on arvioitu karkeammin kuin suoraan liittyjän tiloihin tulevien komponenttien kustannuksia. Internet-palvelun tuottamisen kustannuksia ei ole tässä kustannuslaskelmassa huomioitu. Käytettyjen komponenttien arvioidut hinnat on esitelty seuraavassa taulukossa.

TKK SÄHKÖTEKNIKA-  
OSASTON KIRJASTO  
OTAKAARI 5 A  
02150 ESPOO



*Taulukko 11. Liityntäverkon komponenttien hintoja, jossa vastaanottimen (suunta-antenni ja taajuusmuunnin) hinta on tuntematon X. Taulukossa on esitetty myös liityntäverkkoon kuulumattoman langattoman lähiverkkokortin hinta ja arvioitu hintakehitysryhmä.*

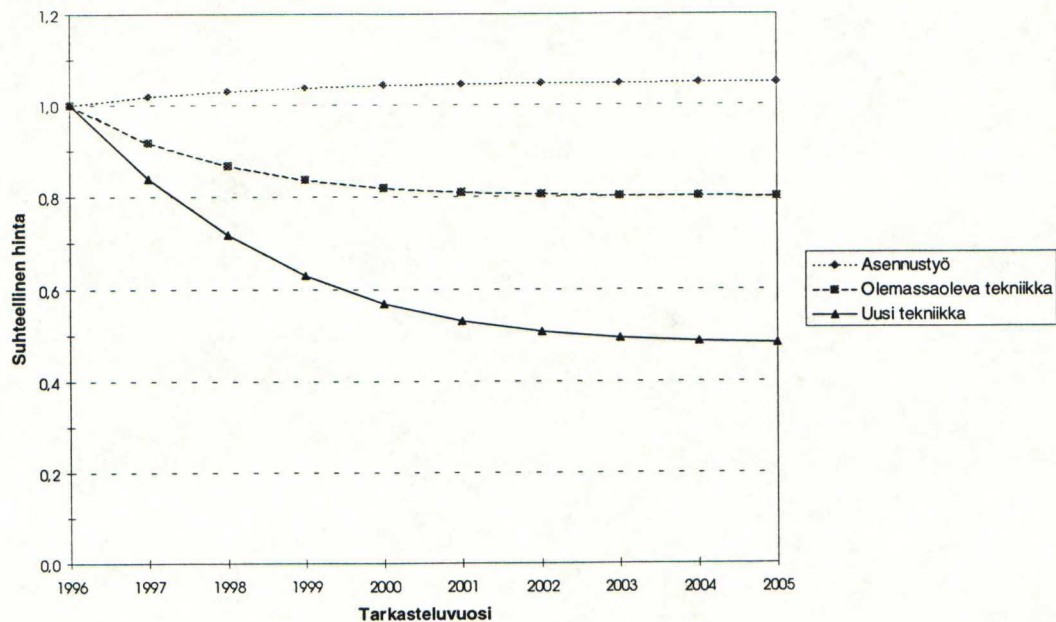
Komponentin nimi	Komponentin hinta [mk]	Hintakehitysryhmä
Tukiaseman asennustyö	30 000	Asennustyö
Suunta-antennin asennus	200	Asennustyö
8·2 Mbit/s yhteys tukiasemalta verkon solmupisteeseen	150 000	Vanha tuote
Silta lähiverkosta siirtoyhteydelle	15 000	Vanha tuote
Tukiasemakortti	10 400	Uusi tuote
Sektoriantenni (45° ja 120°, 20 dBi)	4 375	Vanha tuote
Suuntaantenni (45 cm, 37 dBi) ja taajuusmuunnin (2,46 GHz ⇔ 17,6 GHz)	X	Uusi tuote
Langaton lähiverkko-kortti <sup>3</sup>	3 600	Uusi tuote

Kaikille käytetyille komponenteille on myös arvioitu hintakehitys sen mukaan, ovatko ne asennustyötä, uutta tekniikkaa vai jo käytössä koeteltua tuttua ja tunnettua tekniikkaa. Kunkin komponentin hintakehitysryhmä on mainittu edellisessä taulukossa. Eri hintakehitysryhmien suhteellinen hintakehitys on esitetty kuvassa 30.

Arvioidussa hintakehityksessä vasta elinkaarensa alussa olevan tekniikan hinta puolittuu noin viidessä vuodessa. Jo käytössä olevan tutumman tekniikan hinta on kymmenen vuoden kuluttua 20% halvempaa kuin tarkastelujakson alussa. Käyttö- ja huoltokuluja on verkon kustannuksia laskettaessa otettu huomioon siten, että asennustyön kulut ovat 3% vuosittaisen investoinnin määrästä ja muiden komponenttien huoltokustannukset ovat 7% vuosittaisen investoinnin määrästä.

<sup>3</sup> Ei kuulu liityntäverkkoon, komponentti on asiakkaan omaisuutta



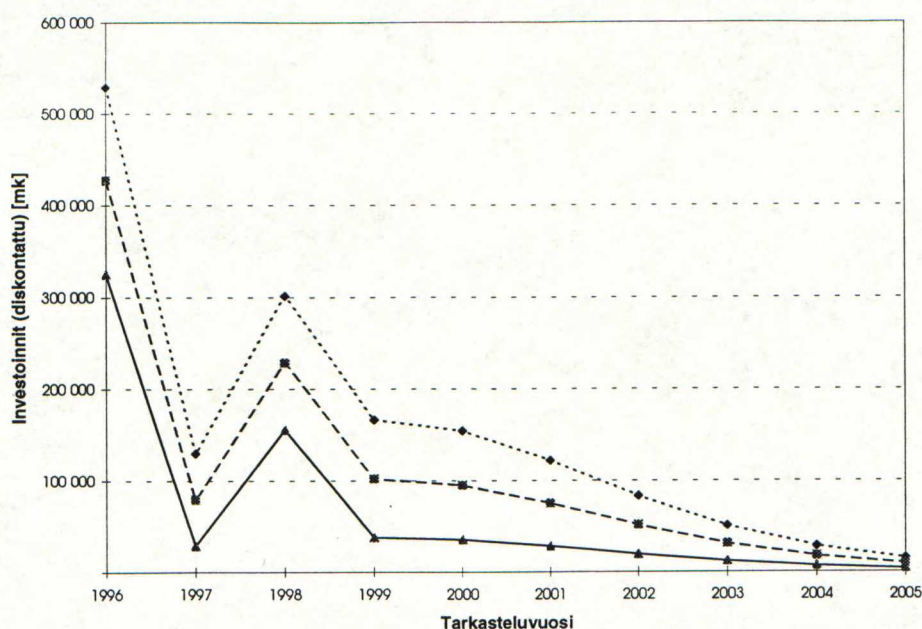


Kuva 30. Asennustyön, teknisesti uuden tekniikan ja jo kehittyneen tekniikan arvioitu hintakehitys tarkasteluvuosittain.

## 6.5 Tulokset

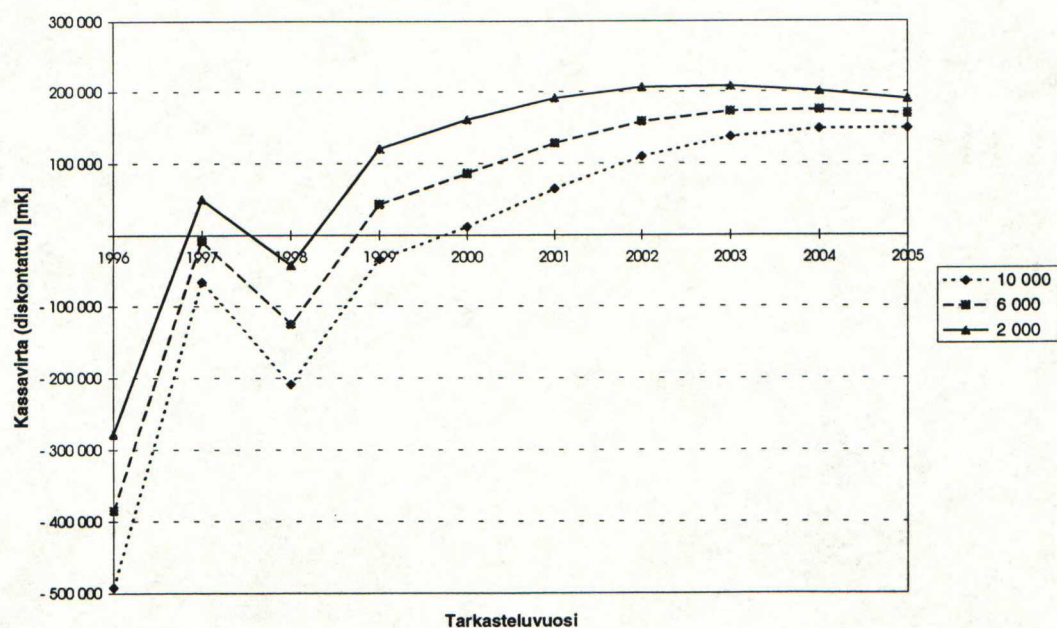
Tässä luvussa tehdyt laskelmat perustuvat oletuksiin, jotka saattavat sisältää ennalta-arvaamattomia virhearviointeja. Tehdyillä oletuksilla on mahdollista laskea yhden tukiaseman käsittävään langattomaan liityntäverkkoon vaadittavien investointien (diskontattu) määrä tarkasteluvuosittain vastaanottimen (suunta-antenni ja taajuusmuunnin) hinnan funktiona, joka vaihtelee välillä 2000-10000 mk.

Kuvan 31 mukaan alkuinvestoinneissa ero vastaanottimen hinnassa on merkittävä. Kuvasta voidaan nähdä kolmantena toimintavuotena verkon kapasiteetin kasvattamiseksi tehdyt lisäinvestoinnit varsin selvästi.



Kuva 31. Langattomaan liityntäverkkoon tehtävien investointien (diskontattu) riippuvuus vastaanottimen alkuhinnasta vuonna 1996.

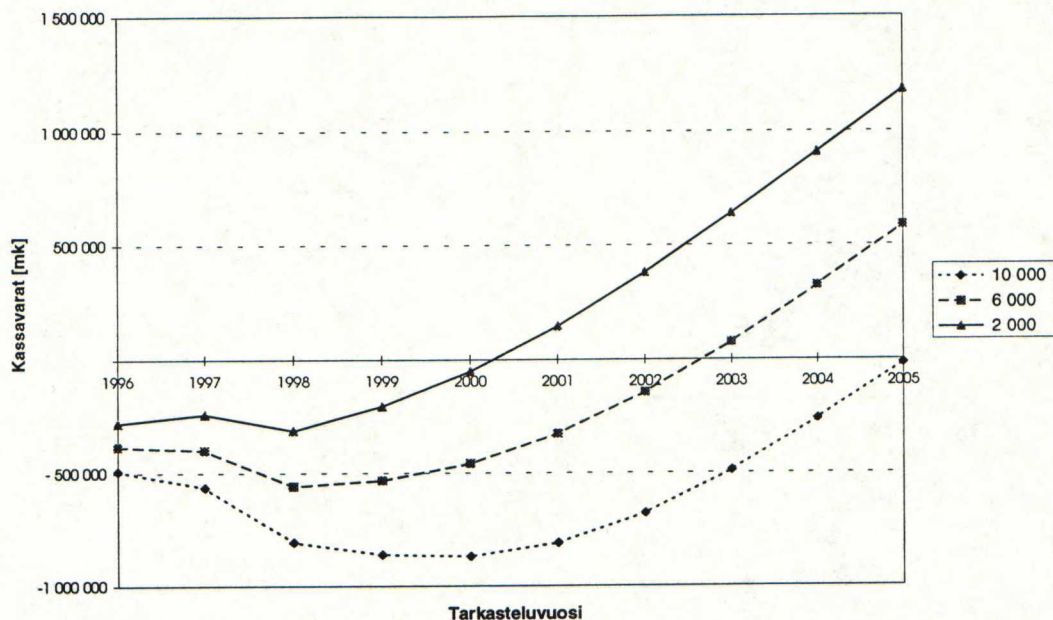
Samoilla tehdyillä oletuksilla on mahdollista laskea myös koko toiminta-ajan vuosittainen diskontattu kassavirta ja kassavarat vastaanottimen hinnan funktiona. Nämä on esitetty kuvissa 32 ja 33.



Kuva 32. Langattoman liityntäverkon kassavirran (diskontattu) riippuvuus vastaanottimen alkuhinnasta vuonna 1996.



Verkon kapasiteetin lisäys näkyy myös kassavirrassa (vuosittaiset tulot vähennettynä menoilla), kolmantena vuotena tehdyt investoinnit painavat kassavirran vielä negatiiviseksi kaikissa vaihtoehdoissa. Kuvassa 33 on esitetty kassavarat eli ensimmäisestä vuodesta tarkasteluvuoteen asti laskettu kumulatiivinen kassavirta tarkasteluvuosittain.



Kuva 33. Langattoman liityntäverkon kassavarojen riippuvuus vastaanottimen alkuhinnasta vuonna 1996.

Yhteenvetona eri vaihtoehdoista voidaan esittää vielä muutama taloudellinen tunnusluku. Näitä ovat investoinnin sisäinen korkokanta IRR (Internal Rate of Return), investoinnin nettonykyarvo NPV (Net Present Value) ja investoinnin takaisinmaksuaika. Investoinnin sisäinen korkokanta kertoo investoidulle rahalle saadun korkoprosentin. Investoinnin nettonykyarvo määritellään nolllaksi silloin, kun sisäinen korkokanta on yhtäsuuri kuin diskonttokorko. Sen voi ymmärtää myös ensimmäiseen vuoteen siirrettynä investoinnin arvona diskontattuna senhetkisen rahan arvoon. Investoinnin takaisinmaksuaika on aika, jossa kassavarat ovat jälleen positiivisella puolella. Laskelmassa käytetty diskonttokorko on 7,5%.

*Taulukko 12. Yhteenveto vastaanottimen hinnan vaikutuksesta investoinnin kannattavuuteen.*

Vastaanottimen hinta	IRR	NPV <sup>4</sup> [mk]	Takaisinmaksu-aika [vuotta]
2000	31,80 %	706 081	5,3
6000	15,55 %	328 423	7,7
10000	(6,50%)	-53 454	>10

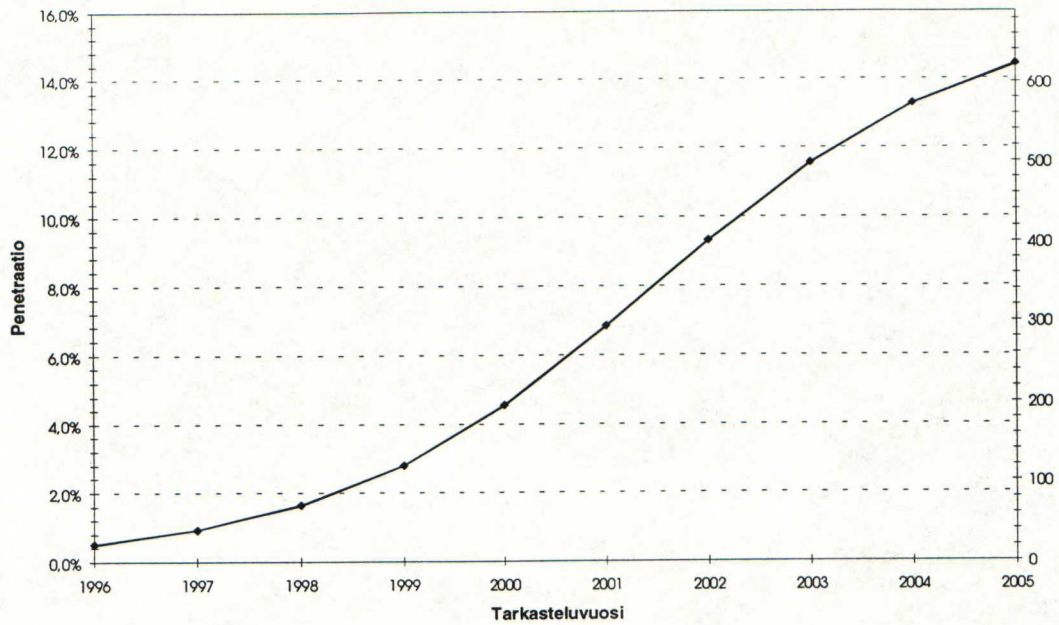
Yhteenvetotaulukosta nähdään, että positiivisia tunnuslukuja kymmenen vuoden tarkastelujaksolla saadaan ainoastaan, jos vastaanottimen hinta on 6000 mk tai vähemmän. Yleinen vaatimus hyvälle sijoitukselle telealalla on alle viiden vuoden takaisinmaksuaika tehdylle investoinnille. Tämän perusteella voidaan arvioida, että jos langattoman lähiverkkopalvelun halutaan täyttävän hyvän sijoituksen tunnusmerkit, tulisi liittyjälle sijoitettavan vastaanottimen hinnan olla noin 2000 mk.

## 6.6 Tulosten herkkyyys palvelun penetraation muutokselle

Edellä esitetyissä tuloksissa oli liittyjien määränä yhdessä sektorissa eli solussa 30. Kuukausittainen liittyjäkohtainen yhteysaika on kuitenkin niin pieni, että käytännössä 2 Mbit/s-kanava on vapaa suurimman osan ajasta. Näin ollen yhteen soluun eli tukiaseman yhteen sektoriin on mahdollista ottaa enemmän kuin 30 liittyjää, kun heille oletetaan statistinen käyttäytymismalli. Jos oletetaan, että maksimissaan 33% liittyjistä käyttää palvelua yhtäaikaa, on yhteen soluun mahdollista ottaa 90 liittyjää säilyttäen kuitenkin entinen palvelutaso. Suuremmasta liittyjämäärästä solua kohti on seurauksena suurempi palvelun penetraatio palvelualueella, jos taloustiheys ja peittoalueen koko pidetään yhä entisellään. Oletetaan palvelulle suurempi seuraavan kuvan mukainen loppupenetraatio.

<sup>4</sup> Diskonttokorko 7,5 %

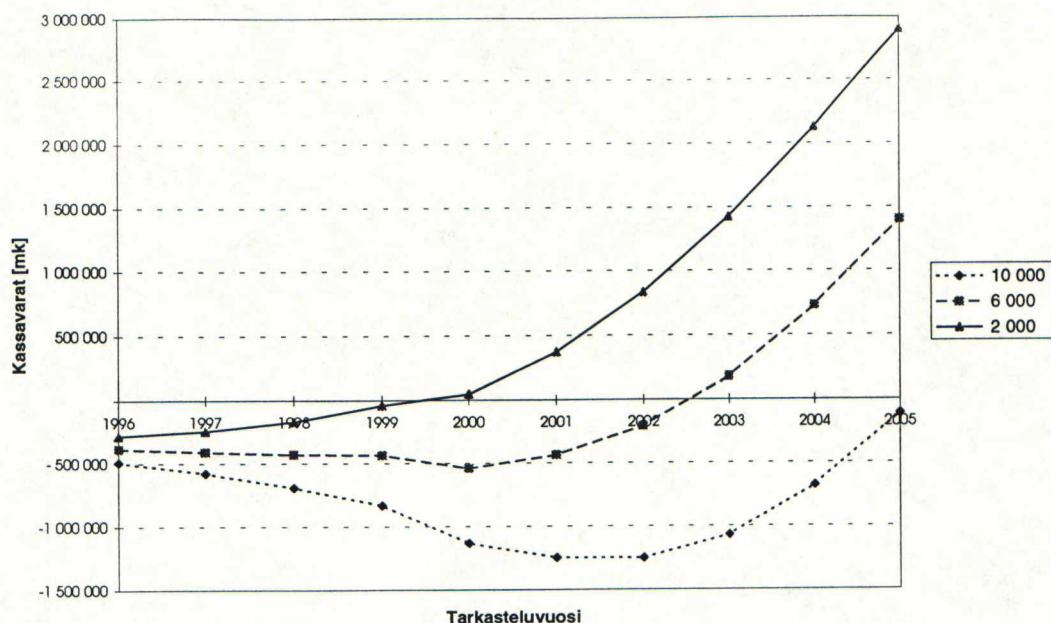




*Kuva 34. Liittyjien uusi penetraatio ja potentiaalisen asukastiheyden mukainen uusi liittymien lukumäärä tarkasteluvuosittain.*

Palvelun penetraatiokehityksen on oletettu nousevan 0,5 prosentista 16 prosenttiin kymmenen vuoden aikana S-kurvia noudattaen. Tällöin liittymien lukumäärä verkossa kymmenentenä vuotena olisi yli 600.

Kuvassa 35 on esitetty tämän liittymämäärän mukaisen langattoman lähiverkon eri vastaanottimen hinnoilla lasketut kassavarat tarkasteluvuosittain. Siitä voimme nähdä, että suurempi liittymämäärä ei pienennä investoinnin takaisinmaksuaikaa ainakaan merkittävästi. Joissain tapauksissa se voi jopa pidentää sitä, koska verkon aloitusvaiheessa huomattavan kalliita tilaajapään laitteita joudutaan hankkimaan enemmän.



Kuva 35. Langattoman liityntäverkon kassavarojen riippuvuus vastaanottimen alkuhinnasta vuonna 1996 uudella palvelun penetraatiolla.

Yhteenvedona seuraavaksi on esitetty tämän laskelman taloudelliset tunnusluvut.

Taulukko 13. Yhteenvedo vastaanottimen hinnan vaikutuksesta investoinnin kannattavuuteen uudella palvelun penetraatiolla.

Vastaanottimen hinta	IRR	NPV <sup>5</sup> [mk]	Takaisinmaksu-aika [vuotta]
2000	50,98 %	1 922 469	4,5
6000	27,00 %	1 240 942	7,5
10000	13,95 %	555 197	>10

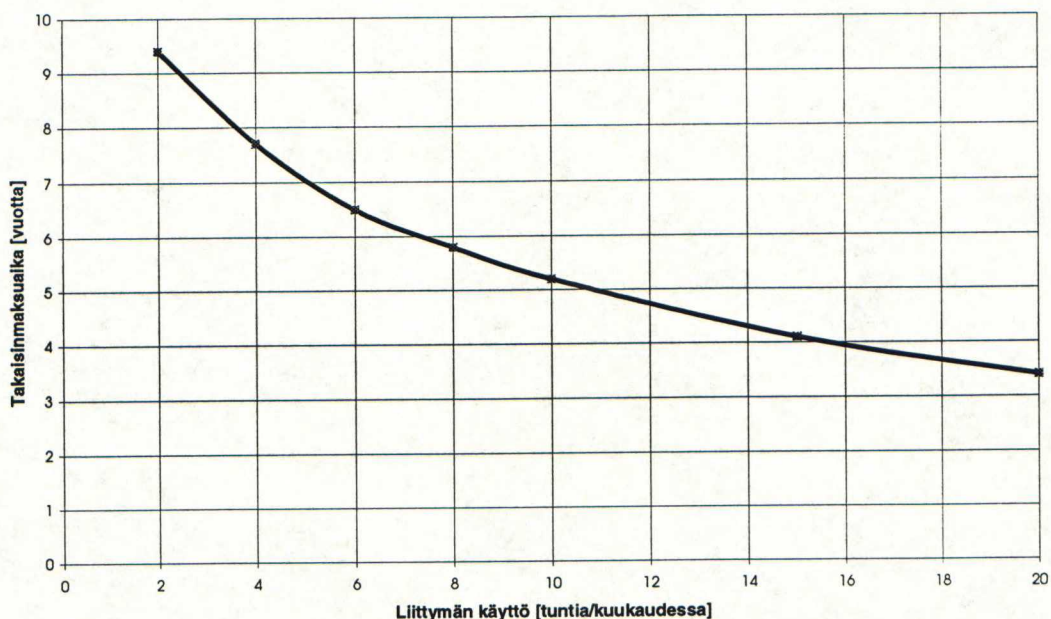
Lopputuloksena tulosten herkkyydelle palvelun penetraatiosta voidaan todeta, että verkon kannattavuus ei riipu kovinkaan voimakkaasti penetraatiosta. Verkon kustannuksia dominoi tilaajapään kustannukset, ja liittyjien määrän kasvu ei vaikuta kustannuksiin liittyjää kohti.

<sup>5</sup> Diskonttokorko 7,5 %



## 6.7 Tulosten herkkyys palvelun käyttötuntien määrälle kuukaudessa

Edellä olevissa laskelmissa on oletettu keskimääräisen palvelun käyttäjän käyttävän palvelua 4 tuntia kuukaudessa. Seuraavassa kuvassa on esitetty, kuinka keskimääräisen palvelun käyttötuntien määrän muuttuminen vaikuttaa kaikkiin laskettuihin tuloksiin. Siinä esitetään investoinnin takaisinmaksuajan riippuvuus liittymän keskimääräisestä palvelun käytöstä kuukaudessa. Vastaanottimen hinnaksi oletetaan 6000 mk ja palvelun penetraatiokäyrä nousee 0,5% - 5% kymmenessä vuodessa (katso Kuva 27).



Kuva 36. Takaisinmaksuajan herkkyys kuukausittaiselle käyttötuntien määrälle.

Kuvasta nähdään, että edellä lasketut tulokset muuttuvat merkittävästi keskimääräisen käyttötuntien määrän muuttuessa. Palvelun keskimääräistä käyttöä voidaan arvioida luotettavammin vasta verkon liikennemittausten perusteella, joten kaikki kuvassa näkyvät arvot keskimääräisten käyttötuntien määrälle ovat yhtä todennäköisiä.

Joitakin arvioita on kuitenkin mahdollista tehdä lukuisten Internetin käytöstä tehtyjen tutkimusten perusteella. Taloustutkimus Oy:n tekemän tutkimuksen [16] mukaan kotonaan verkkoa käyttävien keskimääräinen yhteysaika on 4,8 tuntia viikossa ja

kaikki vähintään kerran viikossa verkossa kävijät viettävät aikaa siellä keskimäärin 3,3 tuntia. Toisen Internet-verkossa tehdyn tutkimuksen [17] mukaan kaikkien vastaajien keskimääräinen viikottainen käyttöaika on jopa 18,9 tuntia viikossa. Tämä tutkimus on kuitenkin saanut osakseen voimakasta kritiikkiä lähinnä selvityksen menettelytavasta. Internet-verkossa olleeseen kyselyyn vastaavat vain verkossa liikkuvat suurkäyttäjät, joten kyselyä ei voida käyttää kuvaamaan keskimääräistä suomalaista Internet-käyttäjää.

Joka tapauksessa näidenkin tutkimusten perusteella voidaan arvioida, että tämän diplomityön laskennassa käytetty 4 tuntia kuukaudessa saattaa olla liian varovainen arvio palvelun käytöstä. Taloustutkimuksen tekemän tutkimuksen mukaan (otos 2506 suomalaista, virhemarginaali 3-6 prosenttiyksikköä) kerran viikossa Internet-verkossa kävijät viettäisivät siellä aikaa noin 14 tuntia kuukaudessa (3,3 tuntia/viikko). Nämä yhteydet otetaan kuitenkin suurimmaksi osaksi modeemiyhteyksiä käyttäen edullisten viikonloppu- tai iltatariffien aikana. ISDN-yhteyttä (64 kbit/s) käyttävien määrä on vielä tällä hetkellä ainoastaan muutamien prosenttien luokkaa (lähteen [17] mukaan 3,3%) ja ISDN-käyttäjän keskimääräinen käyttötuntimäärä on kalliimpien tariffien vuoksi luultavasti keskiarvoa pienempi.



## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

---

Vuoden 1996 aikana on määrä valmistua kaksi merkittävää standardia langattomille lähiverkoille. Toinen niistä on IEEE 802.11-standardi ja toinen ETSI:n nopea langaton lähiverkkostandardi HIPERLAN. Langattoman lähiverkkoliittymän toteuttaminen ei kuitenkaan ole mahdollista lähiverkkokorteille varatulla taajuuskaistalla. Lähiverkkokorttien suurin sallittu lähetystehotaso (EIRP) on rajoitettu, jolloin lähiverkkokorttien kantama ei ole riittävän suuri. Lähiverkkoliittymä on kuitenkin mahdollista toteuttaa sekoittamalla signaali alkuperäisen lähiverkkokortin tuottamalta taajuudelta halutulle vapaalle taajuushallinnon myöntämälle taajuuskaistalle.

Langattoman lähiverkkoliittymän tarjoamiseksi tätä diplomityötä varten rakennettiin taajuusmuunnin, joka siirtää lähiverkkokortin tuottaman signaalin taajuustasossa toiselle taajuudelle. Tässä tapauksessa kokeiluun käytettiin HIPERLAN-kaistan ja PTP-radiolinkkikaistan välissä olevaa aluetta 17,67 GHz:n ympäristössä. Laboratoriomittauksissa ylössekoitetun signaalin spektrin 17,67 GHz:n taajuudella todettiin mitatuilla yksilöillä täyttävän spektrimuodoltaan vastaavat alkuperäiselle signaalille asetetut vaatimukset 2,46 GHz:n taajuudella. Signaalikaistan ulkopuolisia häiriöitä ei mittauksessa havaittu. Sekoituvaimennus ylössekoituksessa mitattiin olevan noin 16 dB ja alassekoituksessa noin 14 dB. Vastaanottimen kynnystasoksi eli vastaanotetuksi minimiherkkyystasoksi mitattiin noin -66 dBm. Tässä on huononnusta varsinaisen lähiverkkokortin vastaavaan arvoon 16 dB.

Laboratoriomittausten perusteella on mahdollista laskea teoreettinen saavutettava toimintasäde eli solunsäde. Olettaen signaalin etenevän vapaassa tilassa saatiin solunsäteeksi noin 1 km, kun tukiaseman sektoriantennissa on 21 dB antennivahvistusta ja kuluttajan suunta-antennissa 37 dB. Laskelmassa varattiin yhteydelle monitie-etenemisvaraa 5 dB ja sadevaimennusvaraa 2 dB/km. Laskelmasta puuttuu mahdollinen määrän antennin radomin lisävimennus. Johtopäätöksenä saavutettavasta solunsädestä voidaan todeta, että järjestelmävahvistusta olisi parannettava ainakin 5 dB useiden kilometrien solunsäteen saavuttamiseksi.



Lasketun solunsäteen ja Helsingin alueelle lasketun potentiaalisten asiakkaiden määrän perusteella voidaan tehdä laskelma, jossa lopputuloksena arvioidaan vastaanottimen (suunta-antenni ja taajuusmuunnin) tavoitehintaa, joka mahdollistaisi kaupallisesti kannattavan palvelun tarjoamisen. Laskelmassa tehtyjen penetraatio-, tariffi- ja verkon rakenneoletusten perusteella laskelmassa päädyttiin tulokseen, jonka mukaan vastaanottimen hinta tulisi olla halvempi kuin 6000 mk.

Laskelmalle on tehty myös herkkyysanalyysi oletetun penetraation ja keskimääräisen yhteysajan muutoksille. Näistä voidaan todeta, että laskelma ei ole herkkä penetraatiokehityksen muutoksille, koska järjestelmän kustannukset keskittyvät tilaajapäähän. Tällöin asiakkaiden määrän laskeminen tai lisääntyminen ei merkittävästi muuta asiakasta kohden laskettuja kustannuksia. Sen sijaan laskelma on erittäin herkkä keskimääräisen yhteysajan muutoksille. Keskimääräisen yhteysajan luotettava arvioiminen onnistuu kuitenkin vasta tehdyistä liikennemittauksista, tässä laskelmassa on käytetty kuukausittaisena yhteysaikana asiakasta kohden lähdeviitteestä saatua 4 tuntia kuukaudessa. Viimeisten suomalaisista Internet-käyttäjistä tehtyjen tutkimusten mukaan tämä arvio saattaa kuitenkin olla liian varovainen.

Ylössekoitus 2,46 GHz:n taajuudelta 17,67 GHz:n taajuudelle todettiin onnistuvan laboratorio-olosuhteissa resiprookkisella taajuusmuuntimella. Saavutettu kantama ei kuitenkaan ole riittävän suuri kattavan verkon rakentamiseen. Ratkaisuna tähän olisi erottaa sekoittimen ylös- ja alassekoitussuunnat kiertoelimillä ja lisätä vastaanotto-suuntaan pienikohinainen esivahvistin. Tällä ratkaisulla olisi mahdollista saavuttaa useiden kilometrien toimintasäde. Ongelmana on muuntimen entisestäänkin kalliimpi hinta ja mahdolliset värähtelyongelmat taajuusmuuntimessa. Seuraavassa vaiheessa tulisi tutkia langatonta lähiverkkoyhteyttä käytännössä. Tällöin selviäisi todellinen toimintasäde, yhteyttä häiritsevien häiriösignaalien ja kohinan vaikutus, saavutettava palvelutaso ja idean yleinen toimivuus käytännössä. Jatkossa tulisi myös kokeilla edellä mainittua kiertoelimillä ja esivahvistimella parannettua ratkaisua.



## Lähdeluettelo

- [1] Halsall, F. Data Communications, Computer Networks and Open Systems. 3. p. New York 1992. Addison-Wesley. 772 s.
- [2] Dixon, R. C. Spread spectrum systems. 2. p. Kanada 1994. John Wiley & Sons, Inc. 422 s.
- [3] Jeruchim, M. C. Simulation of communication systems. 2. p. New York 1994. Plenum Press. 444 s.
- [4] Zhang, N. Golomb S. W. Sixty-phase generalised Barker sequences, IEEE transactions on information theory, 35(1989)4.
- [5] Laasonen, M. Langattoman lähiverkkotekniikan soveltaminen liityntäverkkoon. Espoo 1995. Diplomityö, Teknillinen Korkeakoulu. 75 s.
- [6] P802.11 (draft). Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Specifications. The Institute of Electrical and Electronics Engineer IEEE. 1994. 203 s.
- [7] ETR 133. Radio Equipment and Systems (RES). High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN); System Definition. European Telecommunications Standards Institute ETSI. 1994. 27 s.
- [8] Wilson, N. Next generation wireless LAN - HIPERLAN overview. Microwaves and RF 95. Lontoo, UK, 10.-12.12.1995. Nexus House. s. 1 ja erillinen moniste 25 s.
- [9] Jones, S. M. RF system requirements for HIPERLAN. Microwaves and RF 95. Lontoo, UK, 10.-12.12.1995. Nexus House. s. 2-6.
- [10] Boyle, P. No Strings Attached. PC Magazine (1995)14, s. 215 - 237.
- [11] Zaganiaris, A. R.2087/TITAN: final project report. Bryssel 1996, TITAN/RACE 2087, R2087/CNE/SCL/DS/L/020/b1. 50 s.
- [12] Saijonmaa, J., Tahkokorpi, M., Welling, I. Cost of investment and revenue modelling and analysis of various networked multimedia services in PTO and CATV operator environments. 7th World Telecommunication Forum, Telecom 95. Geneve, Sveitsi 3.-11.10.1995. International Telecommunication Union ITU. Vol. 2, s. 629-633.
- [13] Niemi, K. Verkkopuhelin murtaa perinteisen puhelinmallin, lähiverkko oppii puhelinvaihteeksi. Tietoverkko (1996)1, s. 47-48.
- [14] Hämäläinen, P. Huokeat ISDN-ratkaisut. Tietokone (1995)12, s. 105-112.
- [15] Helsingin kaupunki. Tilastotietoja Helsingistä. 1.1.1995.
- [16] Tenkanen, I. Internetin tunnettuus ja käyttö. Helsinki 1996. Taloustutkimus Oy. 42 s.
- [17] Järvinen, P. Toinen suomalainen Internet-käyttäjätutkimus. Espoo 1996, Rissa & Järvinen Oy. 29 s.